



Richard Kaiser

# C++ mit Visual Studio 2019

C++17 für Studierende und  
erfahrene Programmierer

EBOOK INSIDE

 Springer Vieweg

---

## C++ mit Visual Studio 2019

---

Richard Kaiser

# C++ mit Visual Studio 2019

C++17 für Studierende und  
erfahrene Programmierer

Prof. Richard Kaiser  
Tübingen, Deutschland

ISBN 978-3-662-59475-9      ISBN 978-3-662-59476-6 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-59476-6>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2021

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung: Martin Börger

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany



Für

Daniel, Alex, Kathy

Emelie, Jonathan, Maximilian, Leonard  
und Matilda

# Vorwort

C++ hat sich in den letzten Jahren rasant entwickelt: Die Neuerungen von C++11, C++14, C++17 und C++20 haben viele Verbesserungen und neue Möglichkeiten gebracht. Vieles, was 2010 noch gut und empfehlenswert war, kann heute besser und sicherer gemacht werden.

Das merkt man als Buchautor und Trainer, der diese ganze Entwicklung begleitet hat, besonders deutlich: Vieles, was man früher einmal geschrieben hat, sollte man heute anders machen. Zwar würde es immer noch kompiliert werden. Aber es ist kein modernes C++ mehr, das dem aktuellen Stand der Technik entspricht und alle Vorteile nutzt.

Dieses Buch stellt C++ auf dem Stand von Visual Studio 2019 im Mai 2020 vor. Das ist nicht nur der Umfang von C++17, sondern auch schon ein Teil von C++20. Auch wenn Module, concepts, `std::span` und der dreifache Vergleichsoperator `<=>` noch nicht vollständig verfügbar sind, kann man die wichtigsten Vorteile schon jetzt zeigen. Wenn der Leser dieses Buch dann in einem oder zwei Jahren in der Hand oder am Bildschirm hat, sieht er schon, wie man sie einsetzen kann.

Dieses Buch entstand einerseits aus meinen Vorlesungen an der Dualen Hochschule Lörrach und andererseits aus zahlreichen Seminaren für Firmen, die sich an Software-Entwickler richten, die C++ professionell einsetzen. Dementsprechend richtet es sich einerseits an **Studierende ohne Vorkenntnisse**. Die Lernziele für diese Gruppe sind:

- Modernes C++ auf dem Stand von 2020 zu lernen. C++ ist nach wie vor eine der am häufigsten eingesetzten Programmiersprachen.
- Programmieren zu lernen, d.h. Programme zu schreiben, die konkrete, vorgegebene Aufgaben lösen. Das ist nur mit viel Übung möglich. Programmieren lernt man nur, indem man es tut. Deshalb enthält dieses Buch auch viele Übungsaufgaben. Es ist unerlässlich, zahlreiche Aufgaben selbständig zu lösen (das müssen nicht die aus diesem Buch sein). Der Schwierigkeitsgrad der Aufgaben reicht von einfachen Wiederholungen des Textes bis zu kleinen Projektchen, die ein gewisses Maß an selbständiger Arbeit erfordern. Die Lösungen der Aufgaben findet man auf <https://www.rkaiser.de>.
- Eine moderne Entwicklungsumgebung kennen- und einsetzen lernen. Visual Studio ist das in der Industrie wohl am häufigsten eingesetzte Werkzeug zur Software-Entwicklung.
- Man hört immer wieder, dass C++ zu schwierig ist, um damit das Programmieren zu lernen. Dieses Buch soll ein in vielen Jahren erprobtes Gegenargument zu dieser Meinung sein. Damit will ich die Komplexität von C++ nicht abstreiten. Aber wer C++ kann, findet sich leicht mit C#, Java usw. zurecht. Der umgekehrte Weg ist meist schwieriger.

Dieses Buch richtet sich aber ebenso an **professionelle Software-Entwickler** mit einer jahrelangen C++-Praxis. Viele C++-Neuerungen machen elementare Sprachkonzepte einfacher und sicherer. Dazu kommen anspruchsvollere Neuerungen, die bessere und effizientere Lösungen ermöglichen, die so vor einigen Jahren noch nicht möglich waren. Sowohl die einfachen als auch die anspruchsvolleren Möglichkeiten haben sich in der industriellen Praxis oft noch nicht herumgesprochen. Oft wird mit C++ noch wie vor 30 Jahren mit C programmiert. Das ist fehleranfällig, unnötig aufwendig und verschenkt Vorteile und Möglichkeiten.

- Für professionelle Entwickler soll dieses Buch einen nahezu vollständigen Überblick über C++17 geben und die Sprachelemente so vorstellen, dass sie in der praktischen Arbeit eingesetzt werden können. Die Erfahrungen aus meinen Firmenseminaren geben mir die Hoffnung, dass die allermeisten Themen abgedeckt sind, die im industriellen Einsatz notwendig sind.
- Da ausschließlich Standard-C++ behandelt wird, ist dieses Buch nicht auf Visual Studio beschränkt. Praktisch alle Ausführungen gelten für jeden standardkonformen C++-Compiler (gcc, Intel, Embarcadero usw.).
- Das moderne C++ bietet auch Programmierern von eingebetteten Anwendungen viele Vorteile gegenüber dem in diesem Anwendungsbereich verbreiteten C. Mit dem modernen C++ gibt es noch weniger Gründe als vorher, solche Anwendungen in C zu schreiben.
- Professionelle Entwickler sollen sich nicht an den Übungsaufgaben stören. Sie haben schon genügend Aufgaben gemacht, sonst wären sie keine Profis geworden. Und außerdem bietet das Tagesgeschäft genügend Übungsaufgaben.

Ich habe nicht nur versucht, die Sprachelemente anschaulich zu beschreiben, sondern auch Kriterien dafür anzugeben, wann und wie man sie sinnvoll einsetzen kann. Viele Empfehlungen aus style guides (z.B. der C++ Core Guidelines, siehe Abschnitt 2.13) sind in den Text eingearbeitet, ohne dass explizit darauf hingewiesen wird.

Dieses Buch erscheint in zwei weitgehend identischen Ausgaben:

- **In der vorliegenden Ausgabe** werden reine Standard-C++-Programme geschrieben, d.h. ohne graphische Benutzeroberfläche. Alle Ein- und Ausgaben erfolgen über die Konsole.
- **In der anderen Ausgabe** „C++ mit Visual Studio 2019 und Windows-Forms-Anwendungen“ werden Programme mit einer grafischen Benutzeroberfläche geschrieben. Alle Ein- und Ausgaben erfolgen über eine Windows-Benutzeroberfläche.

Der Unterschied zwischen den beiden Ausgaben ist meist nur, dass in „C++ mit Visual Studio 2019 und Windows Forms Anwendungen“ Ein- und Ausgaben über ein Windows-Steuer-element (meist eine TextBox) erfolgen

```
textBox1->AppendText("Hello World");
```

während in „C++ mit Visual Studio 2019“ die Konsole verwendet wird:

```
cout << "Hallo world" << endl;
```

Dazu kommen noch etwa 100 Seiten mit unterschiedlichen Inhalten, da diese in Visual Studio nur für den jeweiligen Anwendungstyp verfügbar sind. Die folgenden Themen sind nur in

„C++ mit Visual Studio 2019“ enthalten: Multithreading (Kapitel 17), 15.10 parallele Algorithmen der Standardbibliothek, 2.13 C++ Core Guideline Checks, 11.2 polymorphe Memory Ressourcen (pmr,), Sprachelemente von C++20: 2.14 Module, 14.6 concepts, 4.2.4 *std::span*, 8.2.5 der dreifache Vergleichsoperator `<=>` usw.

Dagegen sind diese Themen nur in der Ausgabe für Windows Forms Anwendungen enthalten: „Steuerelemente für die Benutzeroberfläche“ und „C#/.NET Interoperabilität“ (Kapitel 2 und 19).

Die vorliegende Ausgabe ist eine umfassende Überarbeitung meiner Bücher über C++ mit Visual Studio 2017. Obwohl sich die beiden Jahreszahlen im Titel nur um 2 unterscheiden, ist über die Hälfte komplett neu:

- Große Teile, die heute nicht mehr aktuell sind, wurden entfernt. Vieles wurde auf den aktuellen Stand des modernen C++ gebracht. Wichtige Erweiterungen kamen dazu.
- Eigentlich wollte ich den Umfang wieder auf ca. 800 Seiten begrenzen, um potenzielle Leser nicht schon allein durch das Gewicht und die Fülle des Stoffs abzuschrecken. Das ist mir aber trotz intensivster Bemühungen nicht gelungen.

Anregungen, Korrekturhinweise und Verbesserungsvorschläge sind willkommen. Bitte senden Sie diese an die Mail-Adresse auf meiner Internetseite [www.rkaiser.de](http://www.rkaiser.de).

Bei meinen Seminarteilnehmern und Studenten bedanke ich mich für die zahlreichen Anregungen. Dem Team vom Springer-Verlag danke ich für die Unterstützung und Geduld.

Tübingen, im Juni 2020

Richard Kaiser

# Inhalt

|                                                              |          |
|--------------------------------------------------------------|----------|
| <b>1 Die Entwicklungsumgebung</b>                            | <b>1</b> |
| 1.1 Installation von Visual Studio für C++ Projekte          | 1        |
| 1.2 Ein erstes C++-Projekt                                   | 2        |
| 1.2.1 Ein Projekt für ein Standard-C++-Programm anlegen      | 2        |
| 1.2.2 Ein- und Ausgaben über die Konsole                     | 4        |
| 1.2.3 Fehler beim Kompilieren                                | 6        |
| 1.2.4 Den Quelltext auf Header-Dateien aufteilen             | 8        |
| 1.2.5 Ein Projekt für die Lösung der Übungsaufgaben          | 9        |
| 1.2.6 An einem Projekt weiterarbeiten                        | 10       |
| 1.2.7 Der Start des Compilers von der Kommandozeile $\Theta$ | 10       |
| 1.3 Der Quelltexteditor                                      | 11       |
| 1.3.1 Tastenkombinationen                                    | 12       |
| 1.3.2 Intellisense                                           | 13       |
| 1.3.3 Die Formatierung des Quelltexts                        | 14       |
| 1.3.4 Definitionen einsehen                                  | 14       |
| 1.3.5 Symbole suchen                                         | 15       |
| 1.3.6 Namen umbenennen                                       | 16       |
| 1.3.7 Zeichenfolgen suchen und ersetzen                      | 17       |
| 1.4 Kontextmenüs und Symbolleisten                           | 19       |
| 1.5 Online-Dokumentation                                     | 20       |
| 1.5.1 Die Microsoft-Dokumentation                            | 20       |
| 1.5.2 en.cppreference.com                                    | 23       |
| 1.6 Projekte und der Projektmappen-Explorer                  | 23       |
| 1.6.1 Projekte, Projektdateien und Projektoptionen           | 24       |
| 1.6.2 Projektmappen und der Projektmappen-Explorer           | 25       |
| 1.7 Weiterführende Möglichkeiten $\Theta$                    | 26       |
| 1.7.1 Navigieren                                             | 27       |
| 1.7.2 Code-Ausschnitte                                       | 28       |
| 1.7.3 Aufgabenliste                                          | 29       |
| 1.7.4 Der Objektkatalog und die Klassenansicht $\Theta$      | 29       |
| 1.7.5 Die Fenster von Visual Studio anordnen $\Theta$        | 30       |
| 1.7.6 Einstellungen für den Editor $\Theta$                  | 30       |
| 1.8 Bereitstellung (Deployment) $\Theta$                     | 31       |

|          |                                                                                     |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>2</b> | <b>Elementare Datentypen und Anweisungen .....</b>                                  | <b>33</b> |
| 2.1      | Syntaxregeln.....                                                                   | 33        |
| 2.2      | Variablen und Bezeichner .....                                                      | 37        |
| 2.3      | Ganzzahldatentypen.....                                                             | 41        |
| 2.3.1    | Die interne Darstellung von Ganzzahlwerten .....                                    | 43        |
| 2.3.2    | Ganzzahl-literale und ihr Datentyp .....                                            | 46        |
| 2.3.3    | Typ-Inferenz: Implizite Typzuweisungen mit <i>auto</i> .....                        | 49        |
| 2.3.4    | Initialisierungslisten und Konversionen .....                                       | 50        |
| 2.3.5    | Zuweisungen und Standardkonversionen bei Ganzzahlausdrücken $\Theta$ .....          | 51        |
| 2.3.6    | Operatoren und die „üblichen arithmetischen Konversionen“ .....                     | 54        |
| 2.3.7    | Die Datentypen <i>char</i> und <i>wchar_t</i> .....                                 | 59        |
| 2.3.8    | Der Datentyp <i>bool</i> .....                                                      | 63        |
| 2.4      | Kontrollstrukturen und Funktionen.....                                              | 68        |
| 2.4.1    | Die <i>if</i> - und die Verbundanweisung.....                                       | 68        |
| 2.4.2    | Die <i>for</i> -, die <i>while</i> - und die <i>do</i> -Schleife .....              | 72        |
| 2.4.3    | Funktionen und der Datentyp <i>void</i> .....                                       | 76        |
| 2.4.4    | Eine kleine Anleitung zum Erarbeiten der Lösungen.....                              | 80        |
| 2.4.5    | Wert- und Referenzparameter.....                                                    | 84        |
| 2.4.6    | Die Verwendung von Bibliotheken und Namensbereichen .....                           | 84        |
| 2.4.7    | Zufallszahlen .....                                                                 | 86        |
| 2.4.8    | Default-Argumente .....                                                             | 88        |
| 2.4.9    | <i>if</i> und <i>switch</i> mit Variablendefinitionen .....                         | 90        |
| 2.4.10   | Programmierstil für Funktionen.....                                                 | 92        |
| 2.4.11   | Rekursive Funktionen .....                                                          | 97        |
| 2.4.12   | Die <i>switch</i> -Anweisung $\Theta$ .....                                         | 104       |
| 2.4.13   | Bedingte Kompilation mit <i>if constexpr</i> $\Theta$ .....                         | 107       |
| 2.4.14   | Die Sprunganweisungen <i>goto</i> , <i>break</i> und <i>continue</i> $\Theta$ ..... | 108       |
| 2.4.15   | Assembler-Anweisungen $\Theta$ .....                                                | 110       |
| 2.5      | Gleitkommatypen .....                                                               | 111       |
| 2.5.1    | Die interne Darstellung von Gleitkommawerten.....                                   | 111       |
| 2.5.2    | Der Datentyp von Gleitkommaliteralen .....                                          | 114       |
| 2.5.3    | Standardkonversionen.....                                                           | 115       |
| 2.5.4    | Mathematische Funktionen.....                                                       | 122       |
| 2.6      | Der Debugger, Tests und Ablaufprotokolle.....                                       | 126       |
| 2.6.1    | Der Debugger .....                                                                  | 127       |
| 2.6.2    | Der Debugger – Weitere Möglichkeiten $\Theta$ .....                                 | 130       |
| 2.6.3    | CPU Auslastung beobachten mit dem Leistungs-Profiler $\Theta$ .....                 | 135       |
| 2.6.4    | Speicherauslastung beobachten mit dem Leistungs-Profiler $\Theta$ .....             | 136       |
| 2.6.5    | Systematisches Testen.....                                                          | 138       |
| 2.6.6    | Unittests: Funktionen, die Funktionen testen.....                                   | 144       |
| 2.6.7    | Ablaufprotokolle.....                                                               | 148       |
| 2.6.8    | Symbolische Ablaufprotokolle .....                                                  | 152       |
| 2.7      | Konstanten.....                                                                     | 157       |
| 2.7.1    | Laufzeitkonstanten mit <i>const</i> .....                                           | 160       |
| 2.7.2    | Compilezeit-Konstanten mit <i>constexpr</i> .....                                   | 161       |
| 2.7.3    | <i>constexpr</i> Funktionen.....                                                    | 163       |
| 2.7.4    | <i>static_assert</i> und Unittests zur Compilezeit .....                            | 165       |
| 2.8      | Kommentare .....                                                                    | 166       |

|          |                                                                                 |            |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.8.1    | Kommentare zur internen Dokumentation .....                                     | 167        |
| 2.8.2    | Intellisense- und Doxygen Kommentare .....                                      | 170        |
| 2.9      | Exception-Handling Grundlagen: <i>try</i> , <i>catch</i> und <i>throw</i> ..... | 171        |
| 2.10     | Namensbereiche – Grundlagen.....                                                | 176        |
| 2.11     | Präprozessoranweisungen .....                                                   | 178        |
| 2.11.1   | Die <i>#include</i> -Anweisung.....                                             | 178        |
| 2.11.2   | Makros $\Theta$ .....                                                           | 179        |
| 2.11.3   | Bedingte Kompilation .....                                                      | 182        |
| 2.11.4   | Pragmas $\Theta$ .....                                                          | 186        |
| 2.12     | Attribute .....                                                                 | 188        |
| 2.13     | Der Visual Studio C++ Core Guidelines Checker .....                             | 190        |
| 2.14     | Module (C++20).....                                                             | 193        |
| 2.14.1   | Installation und Einstellungen für Module in Visual Studio 2019 16.5.....       | 194        |
| 2.14.2   | Die Standardbibliothek als Modul verwenden.....                                 | 195        |
| 2.14.3   | Module definieren.....                                                          | 196        |
| 2.15     | Compiler Feature Test Makros .....                                              | 198        |
| 2.15.1   | Der Präprozessorkonstanten-Ausdruck <i>__has_include</i> .....                  | 198        |
| 2.15.2   | Die <i>__cpp_xxx</i> -Makros.....                                               | 198        |
| 2.15.3   | <i>__has_cpp_attribute</i> .....                                                | 199        |
| <b>3</b> | <b>Die Stringklassen: <i>string</i>, <i>wstring</i> usw. ....</b>               | <b>201</b> |
| 3.1      | Die Definition von Variablen eines Klassentyps .....                            | 202        |
| 3.2      | Einige Elementfunktionen der Klasse <i>string</i> .....                         | 204        |
| 3.3      | Raw-String-Literale (Rohzeichenfolgen) .....                                    | 214        |
| 3.4      | Stringkonversionen .....                                                        | 216        |
| 3.4.1    | C++11-Konversionsfunktionen: <i>to_string</i> , <i>stoi</i> usw. ....           | 217        |
| 3.4.2    | C++17-Konversionsfunktionen: <i>to_chars</i> und <i>from_chars</i> .....        | 219        |
| 3.4.3    | Konversionen mit Stringstreams $\Theta$ .....                                   | 223        |
| 3.5      | <i>string_view</i> –Strings zum Anschauen .....                                 | 225        |
| 3.6      | Unicode-Strings $\Theta$ .....                                                  | 229        |
| 3.7      | Landespezifische Einstellungen $\Theta$ .....                                   | 230        |
| 3.8      | Reguläre Ausdrücke $\Theta$ .....                                               | 232        |
| <b>4</b> | <b>Arrays und Container.....</b>                                                | <b>243</b> |
| 4.1      | Synonyme für Datentypen.....                                                    | 244        |
| 4.1.1    | Einfache <i>typedef</i> -Deklarationen.....                                     | 244        |
| 4.1.2    | Synonyme für Datentypen mit <i>using</i> .....                                  | 244        |
| 4.2      | Eindimensionale Arrays.....                                                     | 245        |
| 4.2.1    | Arrays im Stil von C .....                                                      | 245        |
| 4.2.2    | Arrays des Typs <i>std::array</i> .....                                         | 248        |
| 4.2.3    | Dynamische Arrays des Typs <i>std::vector</i> .....                             | 249        |
| 4.2.4    | Arrays mit <i>std::span</i> als Parameter übergeben .....                       | 252        |
| 4.2.5    | Die Initialisierung von Arrays bei ihrer Definition .....                       | 253        |
| 4.2.6    | Vorteile von <i>std::array</i> und <i>std::vector</i> gegenüber C-Arrays.....   | 255        |
| 4.2.7    | Ein einfaches Sortierverfahren (Auswahlsort).....                               | 258        |

|          |                                                                                               |            |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.3      | Arrays als Container .....                                                                    | 259        |
| 4.4      | Mehrdimensionale Arrays $\Theta$ .....                                                        | 262        |
| 4.5      | Dynamische Programmierung $\Theta$ .....                                                      | 264        |
| <b>5</b> | <b>Einfache selbstdefinierte Datentypen.....</b>                                              | <b>267</b> |
| 5.1      | Mit <i>struct</i> definierte Klassen .....                                                    | 267        |
| 5.2      | Aufzählungstypen .....                                                                        | 272        |
| 5.2.1    | Schwach typisierte Aufzählungstypen (C/C++03).....                                            | 273        |
| 5.2.2    | <i>enum</i> Konstanten und Konversionen $\Theta$ .....                                        | 274        |
| 5.2.3    | Stark typisierte Aufzählungstypen (C++11).....                                                | 275        |
| <b>6</b> | <b>Zeiger, dynamisch erzeugte Variablen und smart pointer .....</b>                           | <b>279</b> |
| 6.1      | Die Definition von Zeigervariablen .....                                                      | 280        |
| 6.2      | Der Adressoperator, Zuweisungen und generische Zeiger .....                                   | 283        |
| 6.3      | Explizite Konversionen $\Theta$ .....                                                         | 288        |
| 6.4      | Ablaufprotokolle für Zeigervariable .....                                                     | 289        |
| 6.5      | Dynamisch erzeugte Variablen.....                                                             | 290        |
| 6.5.1    | <i>new</i> und <i>delete</i> .....                                                            | 291        |
| 6.5.2    | Der Unterschied zu „gewöhnlichen“ Variablen.....                                              | 294        |
| 6.5.3    | Der Smart Pointer Typ <i>unique_ptr</i> .....                                                 | 297        |
| 6.5.4    | Dynamische erzeugte eindimensionale Arrays .....                                              | 298        |
| 6.5.5    | <i>nothrow-new</i> $\Theta$ .....                                                             | 300        |
| 6.6      | Stringlitterale, nullterminierte Strings und <i>char*</i> -Zeiger .....                       | 301        |
| 6.7      | Memory Leaks finden .....                                                                     | 306        |
| 6.7.1    | Mit Visual C++ memory-leaks finden $\Theta$ .....                                             | 306        |
| 6.7.2    | Mit überladenen <i>new</i> - und <i>delete</i> -Operatoren memory-leaks finden $\Theta$ ..... | 307        |
| 6.8      | Verkettete Listen.....                                                                        | 311        |
| 6.9      | Binärbäume $\Theta$ .....                                                                     | 321        |
| <b>7</b> | <b>Überladene Funktionen und Operatoren.....</b>                                              | <b>327</b> |
| 7.1      | Inline-Funktionen $\Theta$ .....                                                              | 327        |
| 7.2      | Überladene Funktionen .....                                                                   | 330        |
| 7.2.1    | Funktionen, die nicht überladen werden können.....                                            | 332        |
| 7.2.2    | Regeln für die Auswahl einer passenden Funktion .....                                         | 333        |
| 7.3      | Überladene Operatoren mit globalen Operatorfunktionen.....                                    | 339        |
| 7.3.1    | Globale Operatorfunktionen .....                                                              | 341        |
| 7.3.2    | Die Ein- und Ausgabe von selbst definierten Datentypen .....                                  | 344        |
| 7.3.3    | <i>new</i> und <i>delete</i> überladen .....                                                  | 346        |
| 7.4      | Referenztypen, Wert- und Referenzparameter.....                                               | 350        |
| 7.4.1    | Wertparameter .....                                                                           | 350        |
| 7.4.2    | Referenztypen.....                                                                            | 351        |
| 7.4.3    | Referenzparameter .....                                                                       | 352        |
| 7.4.4    | Referenzen als Rückgabetypen.....                                                             | 355        |
| 7.4.5    | Konstante Referenzparameter.....                                                              | 357        |



|                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------|-----|
| 7.5 Reihenfolge der Auswertung von Ausdrücken seit C++17 ..... | 358 |
|----------------------------------------------------------------|-----|

## 8 Objektorientierte Programmierung..... 361

|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.1 Klassen.....                                                                       | 362 |
| 8.1.1 Datenelemente und Elementfunktionen.....                                         | 362 |
| 8.1.2 Der Gültigkeitsbereich von Klassenelementen .....                                | 367 |
| 8.1.3 Datenkapselung: Die Zugriffsrechte <i>private</i> und <i>public</i> .....        | 370 |
| 8.1.4 Der Aufruf von Elementfunktionen und der <i>this</i> -Zeiger .....               | 376 |
| 8.1.5 Konstruktoren und Destruktoren.....                                              | 377 |
| 8.1.6 <i>shared_ptr</i> : Smart Pointer für Klassenelemente .....                      | 390 |
| 8.1.7 OO Analyse und Design: Der Entwurf von Klassen .....                             | 391 |
| 8.1.8 Klassendiagramme.....                                                            | 395 |
| 8.1.9 Initialisierungslisten für Variablen, Argumente und Rückgabewerte.....           | 396 |
| 8.1.10 Initialisierungslisten als Parameter.....                                       | 398 |
| 8.1.11 Implizite Typzuweisungen mit <i>auto</i> .....                                  | 400 |
| 8.2 Klassen als Datentypen .....                                                       | 405 |
| 8.2.1 Der Standardkonstruktor .....                                                    | 406 |
| 8.2.2 Elementinitialisierer.....                                                       | 408 |
| 8.2.3 <i>friend</i> -Funktionen und -Klassen.....                                      | 414 |
| 8.2.4 Überladene Operatoren mit Elementfunktionen.....                                 | 417 |
| 8.2.5 Der dreifache Vergleichsoperator $\Leftrightarrow$ (Spaceship Operator).....     | 421 |
| 8.2.6 Der Kopierkonstruktor .....                                                      | 426 |
| 8.2.7 Der Zuweisungsoperator = für Klassen.....                                        | 430 |
| 8.2.8 Die Angaben <i>=delete</i> und <i>=default</i> .....                             | 436 |
| 8.2.9 Konvertierende und explizite Konstruktoren $\Theta$ .....                        | 438 |
| 8.2.10 Konversionsfunktionen mit und ohne <i>explicit</i> $\Theta$ .....               | 442 |
| 8.2.11 Statische Klassenelemente.....                                                  | 443 |
| 8.2.12 <i>inline</i> Variablen, insbesondere <i>static inline</i> Datenelemente .....  | 448 |
| 8.2.13 Konstante Objekte und Elementfunktionen .....                                   | 450 |
| 8.2.14 <i>std::function</i> : Ein Datentyp für Funktionen und aufrufbare Objekte.....  | 452 |
| 8.2.15 Delegierende Konstruktoren $\Theta$ .....                                       | 457 |
| 8.2.16 Klassen und Header-Dateien .....                                                | 458 |
| 8.3 Vererbung und Komposition .....                                                    | 460 |
| 8.3.1 Die Elemente von abgeleiteten Klassen .....                                      | 461 |
| 8.3.2 Zugriffsrechte auf die Elemente von Basisklassen.....                            | 463 |
| 8.3.3 Verdeckte Elemente .....                                                         | 465 |
| 8.3.4 Konstruktoren, Destruktoren und implizit erzeugte Funktionen .....               | 468 |
| 8.3.5 OO Design: <i>public</i> Vererbung und „ist ein“-Beziehungen.....                | 475 |
| 8.3.6 OO Design: Komposition und „hat ein“-Beziehungen.....                            | 480 |
| 8.3.7 Konversionen zwischen <i>public</i> abgeleiteten Klassen.....                    | 481 |
| 8.3.8 Mehrfachvererbung und virtuelle Basisklassen .....                               | 484 |
| 8.4 Virtuelle Funktionen, späte Bindung und Polymorphie .....                          | 488 |
| 8.4.1 Der statische und der dynamische Datentyp .....                                  | 488 |
| 8.4.2 Virtuelle Funktionen in C++03.....                                               | 490 |
| 8.4.3 Virtuelle Funktionen mit <i>override</i> in C++11 .....                          | 491 |
| 8.4.4 Die Implementierung von virtuellen Funktionen: <i>vptr</i> und <i>vtbl</i> ..... | 501 |
| 8.4.5 Virtuelle Konstruktoren und Destruktoren .....                                   | 507 |

|                                                                           |            |
|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| 8.4.6 Virtuelle Funktionen in Konstruktoren und Destruktoren .....        | 509        |
| 8.4.7 OO-Design: Einsatzbereich und Test von virtuellen Funktionen .....  | 510        |
| 8.4.8 OO-Design und Erweiterbarkeit .....                                 | 512        |
| 8.4.9 Rein virtuelle Funktionen und abstrakte Basisklassen .....          | 515        |
| 8.4.10 OO-Design: Virtuelle Funktionen und abstrakte Basisklassen .....   | 519        |
| 8.4.11 Interfaces und Mehrfachvererbung .....                             | 521        |
| 8.4.12 Objektorientierte Programmierung: Zusammenfassung .....            | 523        |
| 8.5 R-Wert Referenzen und Move-Semantik .....                             | 525        |
| 8.5.1 R-Werte und R-Wert Referenzen .....                                 | 525        |
| 8.5.2 move-Semantik .....                                                 | 528        |
| 8.5.3 R-Werte mit <i>std::move</i> erzwingen .....                        | 530        |
| 8.5.4 Move-Semantik in der C++11 Standardbibliothek .....                 | 535        |
| 8.5.5 Move-Semantik für eigene Klassen .....                              | 536        |
| 8.5.6 Perfect forwarding $\Theta$ .....                                   | 539        |
| <b>9 Namensbereiche .....</b>                                             | <b>541</b> |
| 9.1 Die Definition von Namensbereichen .....                              | 542        |
| 9.2 Die Verwendung von Namen aus Namensbereichen .....                    | 545        |
| 9.3 Header-Dateien und Namensbereiche .....                               | 548        |
| 9.4 Aliasnamen für Namensbereiche $\Theta$ .....                          | 552        |
| 9.5 inline namespaces $\Theta$ .....                                      | 553        |
| <b>10 Exception-Handling .....</b>                                        | <b>555</b> |
| 10.1 Die <i>try</i> -Anweisung .....                                      | 556        |
| 10.2 Exception-Handler und Exceptions der Standardbibliothek .....        | 561        |
| 10.3 <i>throw</i> -Ausdrücke und selbst definierte Exceptions .....       | 564        |
| 10.4 Exceptions weitergeben .....                                         | 570        |
| 10.5 Fehler und Exceptions .....                                          | 573        |
| 10.6 Die Freigabe von Ressourcen bei Exceptions: RAII .....               | 576        |
| 10.7 Exceptions in Konstruktoren und Destruktoren .....                   | 578        |
| 10.8 <i>noexcept</i> .....                                                | 584        |
| 10.9 Exception-Sicherheit .....                                           | 585        |
| 10.10 Die Exception-Klasse <i>system_error</i> $\Theta$ .....             | 588        |
| <b>11 Containerklassen der C++-Standardbibliothek .....</b>               | <b>591</b> |
| 11.1 Sequenzielle Container der Standardbibliothek .....                  | 591        |
| 11.1.1 Die Container-Klasse <i>vector</i> .....                           | 591        |
| 11.1.2 Iteratoren .....                                                   | 596        |
| 11.1.3 Geprüfte Iteratoren (Checked Iterators) .....                      | 599        |
| 11.1.4 Die bereichsbasierte <i>for</i> -Schleife .....                    | 601        |
| 11.1.5 Iteratoren und die Algorithmen der Standardbibliothek .....        | 604        |
| 11.1.6 Die Speicherverwaltung bei Vektoren $\Theta$ .....                 | 607        |
| 11.1.7 Mehrdimensionale Vektoren $\Theta$ .....                           | 609        |
| 11.1.8 Gemeinsamkeiten und Unterschiede der sequenziellen Container ..... | 610        |

|                                                                                           |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 11.1.9 Die Container-Adapter <i>stack</i> , <i>queue</i> und <i>priority_queue</i> Θ..... | 613        |
| 11.1.10 Container mit Zeigern .....                                                       | 614        |
| 11.2 Allokatoren und polymorphic memory resources.....                                    | 615        |
| 11.3 Assoziative Container .....                                                          | 620        |
| 11.3.1 Die Container <i>set</i> und <i>multiset</i> .....                                 | 620        |
| 11.3.2 Die Container <i>map</i> und <i>multimap</i> .....                                 | 621        |
| 11.3.3 Iteratoren der assoziativen Container .....                                        | 623        |
| 11.3.4 Ungeordnete Assoziative Container (Hash-Container) .....                           | 626        |
| 11.4 Zusammenfassungen von Datentypen.....                                                | 630        |
| 11.4.1 Wertepaare mit <i>std::pair</i> .....                                              | 631        |
| 11.4.2 Tupel mit <i>std::tuple</i> .....                                                  | 632        |
| 11.4.3 Strukturierte Bindungen Θ.....                                                     | 633        |
| 11.4.4 <i>std::optional</i> – Eine Klasse für einen oder keinen Wert.....                 | 637        |
| 11.4.5 <i>std::variant</i> – Eine Klasse für Werte bestimmter Typen .....                 | 641        |
| 11.4.6 <i>std::any</i> : Ein Datentyp für Werte beliebiger Typen Θ .....                  | 644        |
| <b>12 Dateibearbeitung mit den Stream-Klassen .....</b>                                   | <b>647</b> |
| 12.1 Stream-Variablen, ihre Verbindung mit Dateien und ihr Zustand .....                  | 647        |
| 12.2 Fehler und der Zustand von Stream-Variablen.....                                     | 651        |
| 12.3 Lesen und Schreiben von Binärdaten mit <i>read</i> und <i>write</i> .....            | 653        |
| 12.4 Lesen und Schreiben mit den Operatoren << und >>.....                                | 659        |
| 12.5 Dateibearbeitung im Direktzugriff Θ .....                                            | 667        |
| 12.6 Manipulatoren und Funktionen zur Formatierung von Texten Θ.....                      | 669        |
| 12.7 Filesystem .....                                                                     | 671        |
| <b>13 Funktoren, Funktionsobjekte und Lambda-Ausdrücke.....</b>                           | <b>677</b> |
| 13.1 Der Aufrufoperator ().....                                                           | 677        |
| 13.2 Prädikate und Vergleichsfunktionen .....                                             | 681        |
| 13.3 Binder Θ.....                                                                        | 686        |
| 13.4 Lambda-Ausdrücke.....                                                                | 689        |
| 13.5 Lambda-Ausdrücke – Weitere Konzepte Θ.....                                           | 698        |
| 13.5.1 Lambda-Ausdrücke werden zu Funktionsobjekten .....                                 | 698        |
| 13.5.2 Nachstehende Rückgabetypen .....                                                   | 699        |
| 13.5.3 Generische Lambda-Ausdrücke.....                                                   | 700        |
| 13.5.4 Lambda-Ausdrücke höherer Ordnung Θ .....                                           | 700        |
| 13.6 Kompatible <i>function</i> -Typen: Kovarianz und Kontravarianz Θ.....                | 701        |
| <b>14 Templates .....</b>                                                                 | <b>703</b> |
| 14.1 Generische Funktionen: Funktions-Templates .....                                     | 704        |
| 14.1.1 Die Deklaration von Funktions-Templates mit Typ-Parametern .....                   | 705        |
| 14.1.2 Spezialisierungen von Funktions-Templates .....                                    | 706        |
| 14.1.3 Fehlersuche bei Template-Instanzierungen .....                                     | 713        |
| 14.1.4 Funktions-Templates mit Nicht-Typ-Parametern .....                                 | 715        |
| 14.1.5 Explizit instanziierte Funktions-Templates Θ.....                                  | 717        |

|                                                                                                       |                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 14.1.6 Explizit spezialisierte und überladene Templates .....                                         | 718            |
| 14.1.7 Rekursive Funktions-Templates $\Theta$ .....                                                   | 722            |
| 14.2 Generische Klassen: Klassen-Templates .....                                                      | 725            |
| 14.2.1 Die Deklaration von Klassen-Templates mit Typ-Parametern .....                                 | 725            |
| 14.2.2 Spezialisierungen von Klassen-Templates .....                                                  | 726            |
| 14.2.3 Klassen-Templates mit Nicht-Typ-Parametern .....                                               | 733            |
| 14.2.4 Explizit instanziierte Klassen-Templates $\Theta$ .....                                        | 735            |
| 14.2.5 Partielle und vollständige Spezialisierungen $\Theta$ .....                                    | 736            |
| 14.2.6 Vererbung mit Klassen-Templates $\Theta$ .....                                                 | 742            |
| 14.2.7 Die Ableitung von Typ-Argumenten bei Klassen-Templates .....                                   | 743            |
| 14.2.8 Alias Templates $\Theta$ .....                                                                 | 747            |
| 14.3 Variablen-Templates $\Theta$ .....                                                               | 748            |
| 14.4 Typ-Argument abhängige Templates mit Type Traits .....                                           | 750            |
| 14.4.1 Eine Konstruktion von type traits .....                                                        | 750            |
| 14.4.2 Die type traits Kategorien .....                                                               | 751            |
| 14.4.3 Type traits und <code>static_assert</code> .....                                               | 753            |
| 14.4.4 Templates mit <i>if constexpr</i> und type traits optimieren .....                             | 755            |
| 14.4.5 Typ-Inferenz mit <i>decltype</i> .....                                                         | 756            |
| 14.5 Variadische Templates .....                                                                      | 760            |
| 14.5.1 Variadische Funktions-Templates .....                                                          | 761            |
| 14.5.2 Fold Ausdrücke .....                                                                           | 764            |
| 14.5.3 Variadische Klassen-Templates am Beispiel von <i>std::tuple</i> .....                          | 766            |
| 14.6 Concepts .....                                                                                   | 767            |
| 14.6.1 concepts mit <i>requires</i> -Ausdrücken .....                                                 | 767            |
| 14.6.2 Vordefinierte concepts .....                                                                   | 770            |
| 14.6.3 Ein Ausblick auf ranges: Algorithmen mit concepts .....                                        | 771            |
| 14.7 Kovarianz und Kontravarianz .....                                                                | 771            |
| <br><b>15 STL-Algorithmen und Lambda-Ausdrücke .....</b>                                              | <br><b>773</b> |
| 15.1 Iteratoren .....                                                                                 | 774            |
| 15.1.1 Die verschiedenen Arten von Iteratoren .....                                                   | 774            |
| 15.1.2 Umkehriteratoren .....                                                                         | 776            |
| 15.1.3 Einfügefunktionen und Einfügeiteratoren .....                                                  | 777            |
| 15.1.4 Stream-Iteratoren .....                                                                        | 779            |
| 15.1.5 Container-Konstruktoren mit Iteratoren .....                                                   | 781            |
| 15.1.6 Globale Iterator-Funktionen $\Theta$ .....                                                     | 782            |
| 15.2 Nichtmodifizierende Algorithmen .....                                                            | 784            |
| 15.2.1 Lineares Suchen .....                                                                          | 785            |
| 15.2.2 Zählen .....                                                                                   | 787            |
| 15.2.3 Der Vergleich von Bereichen .....                                                              | 787            |
| 15.2.4 Suche nach Teilfolgen .....                                                                    | 788            |
| 15.2.5 Minimum und Maximum .....                                                                      | 790            |
| 15.2.6 Mit <i>all_of</i> , <i>any_of</i> , <i>none_of</i> alle Elemente in einem Bereich prüfen ..... | 791            |
| 15.3 Kopieren und Verschieben von Bereichen .....                                                     | 792            |
| 15.4 Elemente transformieren und ersetzen .....                                                       | 794            |
| 15.5 Elementen in einem Bereich Werte zuweisen $\Theta$ .....                                         | 795            |
| 15.6 Elemente entfernen – das <i>erase-remove</i> Idiom .....                                         | 797            |

|                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 15.7 Die Reihenfolge von Elementen vertauschen.....                           | 799 |
| 15.7.1 Elemente vertauschen.....                                              | 799 |
| 15.7.2 Permutationen $\Theta$ .....                                           | 800 |
| 15.7.3 Die Reihenfolge umkehren und Elemente rotieren $\Theta$ .....          | 801 |
| 15.7.4 Elemente durcheinander mischen $\Theta$ .....                          | 802 |
| 15.8 Algorithmen zum Sortieren und für sortierte Bereiche .....               | 802 |
| 15.8.1 Partitionen $\Theta$ .....                                             | 802 |
| 15.8.2 Bereiche sortieren .....                                               | 803 |
| 15.8.3 Binäres Suchen in sortierten Bereichen.....                            | 807 |
| 15.8.4 Mischen von sortierten Bereichen.....                                  | 808 |
| 15.9 Numerische Algorithmen und Datentypen .....                              | 810 |
| 15.9.1 Numerische Algorithmen .....                                           | 810 |
| 15.9.2 Valarrays $\Theta$ .....                                               | 812 |
| 15.9.3 Zufallszahlen mit <code>&lt;random&gt;</code> $\Theta$ .....           | 814 |
| 15.9.4 Komplexe Zahlen $\Theta$ .....                                         | 817 |
| 15.9.5 Numerische Bibliotheken neben dem C++-Standard $\Theta$ .....          | 820 |
| 15.10 Parallele Algorithmen der STL.....                                      | 820 |
| 15.10.1 <code>std::sort</code> .....                                          | 822 |
| 15.10.2 Parallel for mit <code>for_each</code> .....                          | 823 |
| 15.10.3 <code>std::reduce</code> und <code>std::transform_reduce</code> ..... | 826 |

## 16 Zeiten und Kalenderdaten mit *chrono* ..... 829

|                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------|-----|
| 16.1 Brüche als Datentypen: Das Klassen-Template <i>ratio</i> ..... | 829 |
| 16.2 Ein Datentyp für Zeiteinheiten: <i>duration</i> .....          | 831 |
| 16.3 Datentypen für Zeitpunkte: <i>time_point</i> .....             | 834 |
| 16.4 Uhren: <i>system_clock</i> und <i>steady_clock</i> .....       | 837 |

## 17 Multithreading..... 841

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 17.1 Funktionen als Threads starten.....                                                              | 842 |
| 17.1.1 Funktionen mit <i>async</i> als Threads starten.....                                           | 843 |
| 17.1.2 Funktionen mit <i>thread</i> als Threads starten .....                                         | 847 |
| 17.1.3 Lambda-Ausdrücke als Threads starten .....                                                     | 849 |
| 17.1.4 Zuweisungen und <i>move</i> für Threads .....                                                  | 854 |
| 17.1.5 Die Klassen <i>future</i> und <i>promise</i> .....                                             | 855 |
| 17.1.6 Exceptions in Threads und ihre Weitergabe mit <i>promise</i> .....                             | 858 |
| 17.1.7 Der Programmablauf mit <i>async</i> .....                                                      | 863 |
| 17.1.8 Informationen über Threads .....                                                               | 870 |
| 17.1.9 <i>Sleep</i> -Funktionen .....                                                                 | 873 |
| 17.1.10 Threads im Debugger.....                                                                      | 875 |
| 17.2 Kritische Abschnitte.....                                                                        | 876 |
| 17.2.1 Atomare Datentypen .....                                                                       | 879 |
| 17.2.2 Kritische Bereiche mit <i>mutex</i> und <i>lock_guard</i> bzw. <i>scoped_lock</i> sperren..... | 881 |
| 17.2.3 Read/Write-Mutexe mit <i>shared_mutex</i> und <i>shared_lock</i> .....                         | 890 |
| 17.2.4 Die Lock-Klasse <i>unique_lock</i> $\Theta$ .....                                              | 891 |
| 17.2.5 Deadlocks.....                                                                                 | 892 |

|                                                                                            |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 17.2.6 <i>call_once</i> zur Initialisierung von Daten.....                                 | 896        |
| 17.2.7 Thread-lokale Daten.....                                                            | 897        |
| 17.3 Bedingungsvariablen zur Synchronisation von Threads.....                              | 898        |
| 17.4 Die „Parallel Patterns Library“ von Microsoft.....                                    | 901        |
| <br><b>18 Smart Pointer: <i>shared_ptr</i>, <i>unique_ptr</i> und <i>weak_ptr</i>.....</b> | <b>903</b> |
| 18.1 Gemeinsamkeiten von <i>unique_ptr</i> und <i>shared_ptr</i> .....                     | 904        |
| 18.2 <i>unique_ptr</i> .....                                                               | 912        |
| 18.3 <i>shared_ptr</i> .....                                                               | 913        |
| 18.4 Deleter und smart pointer für Arrays .....                                            | 919        |
| 18.5 <i>weak_ptr</i> Θ .....                                                               | 921        |
| <br><b>Literaturverzeichnis .....</b>                                                      | <b>925</b> |
| <br><b>Index.....</b>                                                                      | <b>927</b> |

Θ Angesichts des Umfangs dieses Buches habe ich einige Abschnitte mit dem Zeichen Θ in der Überschrift als „weniger wichtig“ gekennzeichnet. Damit will ich dem Anfänger eine kleine Orientierung durch die Fülle des Stoffes geben. Diese Kennzeichnung bedeutet aber keineswegs, dass dieser Teil unwichtig ist – vielleicht sind gerade diese Inhalte für Sie besonders relevant.



# 1 Die Entwicklungsumgebung

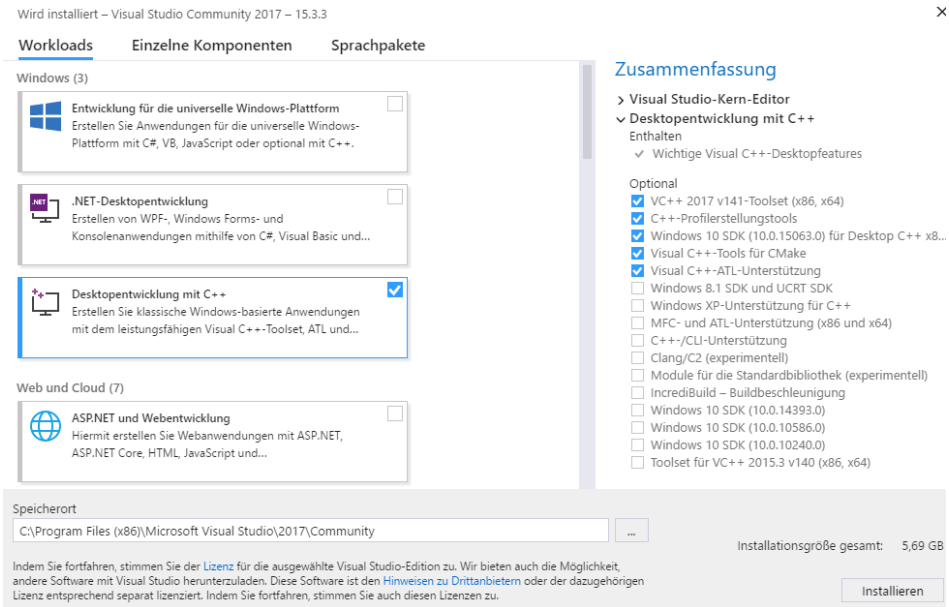
Visual Studio besteht aus verschiedenen Werkzeugen (Tools), die einen Programmierer bei der Entwicklung von Software unterstützen. Eine solche Zusammenstellung von Werkzeugen zur Softwareentwicklung bezeichnet man auch als Programmier- oder **Entwicklungsumgebung**.

Einfache Entwicklungsumgebungen bestehen nur aus einem Editor und einem Compiler. Für eine effiziente Entwicklung von komplexeren Anwendungen sind aber oft weitere Werkzeuge notwendig. Wenn diese wie in Visual Studio in einem einzigen Programm integriert sind, spricht man auch von einer **integrierten Entwicklungsumgebung** (engl.: „integrated development environment“, **IDE**).

In diesem Kapitel wird zunächst an einfachen Beispielen gezeigt, wie man mit Visual Studio 2019 (und früheren Versionen) C++-Programme entwickeln kann. Anschließend (ab Abschnitt 1.3) werden dann die wichtigsten Werkzeuge von Visual Studio ausführlicher vorgestellt. Für viele einfache Anwendungen (wie z.B. die Übungsaufgaben) reichen die Abschnitte bis 1.5. Die folgenden Abschnitte sind nur für anspruchsvollere oder spezielle Anwendungen notwendig. Sie sind deshalb mit dem Zeichen  $\Theta$  (siehe Seite xx) gekennzeichnet und können übergangen werden. Weitere Elemente der Entwicklungsumgebung werden später beschrieben, wenn sie dann auch eingesetzt werden können.

## 1.1 Installation von Visual Studio für C++ Projekte

Damit mit Visual Studio 2019 C++-Programme entwickelt werden können, muss bei der Installation von Visual Studio die „Desktopentwicklung mit C++“ markiert werden:



## 1.2 Ein erstes C++-Projekt

Im Folgenden wird an einem einfachen Beispiel gezeigt, wie man ein Projekt für ein Standard-C++ Programm anlegt. In dieses Programm werden dann einige einfache Anweisungen aufgenommen.

Wenn dabei Begriffe wie „Variable“, „Funktion“ usw. verwendet werden und diese für Sie neu sind, lesen Sie trotzdem weiter – aus dem Zusammenhang erhalten Sie sicherlich eine intuitive Vorstellung, die zunächst ausreicht. Später werden diese Begriffe dann genauer erklärt.

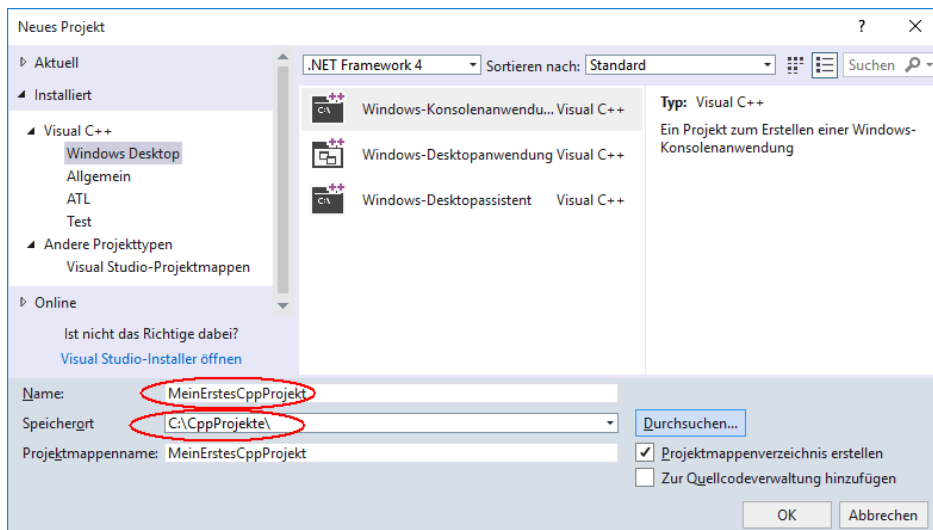
### 1.2.1 Ein Projekt für ein Standard-C++-Programm anlegen

Ein Projekt für ein Standard-C++ Programm erhält man in Visual Studio mit einer Windows-Konsolenanwendung. Eine Konsolenanwendung verwendet wie ein DOS-Programm ein Textfenster für Ein- und Ausgaben. Ein Textfenster ist im Vergleich zu einer grafischen Benutzeroberfläche sehr spartanisch: Es ist nicht möglich, über Buttons oder Menüs verschiedene Aktionen auszuwählen. Obwohl eine Konsolen-Anwendung wie ein DOS-Programm aussieht, kann man es nicht unter MS-DOS, sondern nur unter Windows starten.

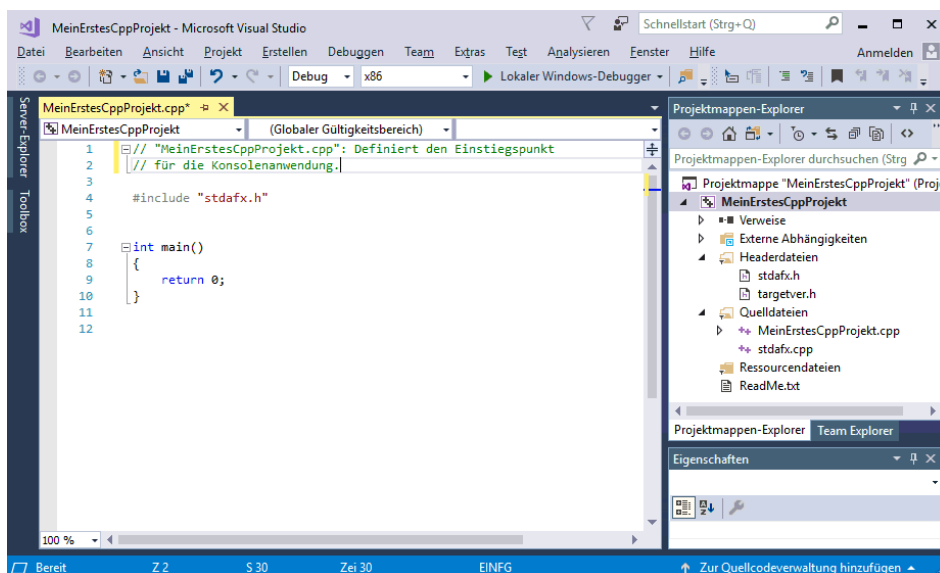
Nach der Installation von Visual Studio wie in Abschnitt 1.1 findet man unter **Datei|Neu|Projekt|Installiert|Visual C++** eine Projektvorlage für Windows-Konsolenanwendungen. Hier gibt man nach *Name* einen Namen und nach *Speicherort* ein Verzeichnis für das Projekt eingibt und dann den OK-Button anklickt:



Ein Projekt für eine solche Anwendung erhält man, indem man nach *Name* einen Namen und nach *Speicherort* ein Verzeichnis für das Projekt eingibt:



Nach dem Anklicken des OK-Buttons wird links der Editor und rechts der Projektmappen-Explorer angezeigt:



Der Editor enthält eine Funktion mit dem Namen *main*:

```
#include "stdafx.h"

int main()
{
    return 0;
}
```

Diese Funktion wird beim Start des Konsolen-Programms aufgerufen. Die Anweisungen, die durch dieses Programm ausgeführt werden sollen, fügt man dann in diese Funktion vor *return* ein.

### 1.2.2 Ein- und Ausgaben über die Konsole

Ein- und Ausgaben erfolgen bei einem Konsolenprogramm vor allem über die nach

```
#include <iostream> // für cin und cout notwendig
using namespace std;
```

vordefinierten Streams

```
cin    // für die Eingabe von der Tastatur
cout   // für die Ausgabe am Bildschirm
```

Die Anmerkungen nach „//“ sind übrigens ein sogenannter **Kommentar** (siehe Abschnitt 2.8). Ein solcher Text zwischen „//“ und dem Zeilenende wird vom Compiler nicht übersetzt und dient vor allem der Erläuterung des Quelltextes.

Für *cout* ist der Ausgabeoperator „>>“ definiert. Damit kann man einen Ausdruck (z.B. einen Text oder den Wert einer Variablen) an der Konsole ausgegeben. Mit *endl* wird ein Zeilenvorschub eingefügt, so dass die nächste Ausgabe in der nächsten Zeile beginnt. Fügt man die Anweisung

```
cout << "Hallo Welt" << endl;
```

in die *main*-Funktion vor *return 0* ein,

```
#include "stdafx.h"

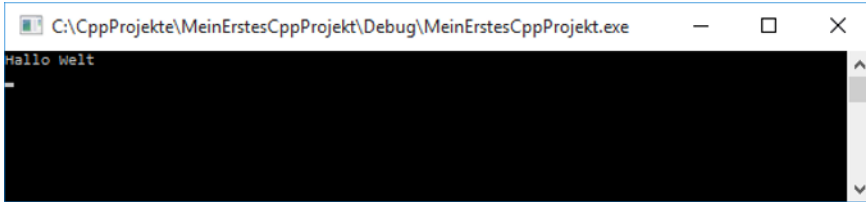
#include <iostream> // für cin und cout notwendig
using namespace std;

int main()
{
    cout << "Hallo Welt" << endl;
    return 0;
}
```

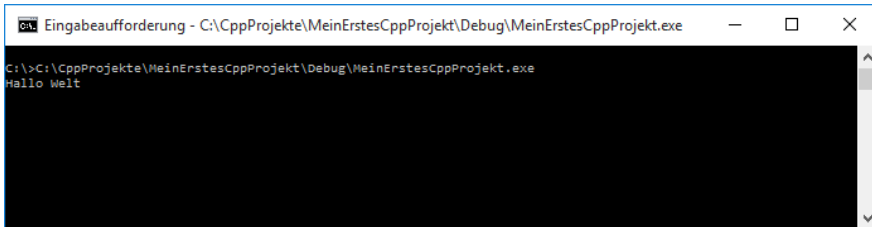
wird beim Start des Programms mit

- mit *Debuggen*|*Debugging starten* von der Menüleiste, oder
- mit *F5* von einem beliebigen Fenster in Visual Studio oder
- durch den Aufruf der vom Compiler erzeugten Exe-Datei.

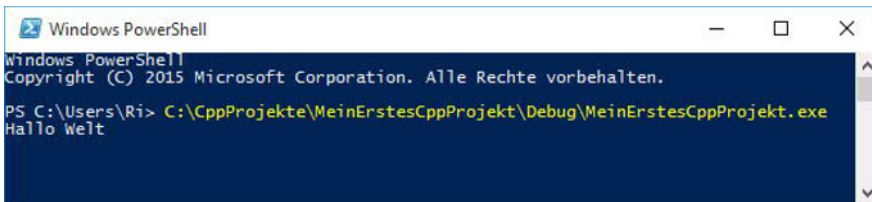
der Text „Hallo Welt“ an der Konsole ausgegeben:



Bitte stören Sie sich nicht daran, dass die Konsole beim Start mit *F5* gleich wieder verschwindet und der Text nur ganz kurz sichtbar ist. Wir werden diesen Schwachpunkt gleich anschließend beheben. Beim Start des Programms von einer Eingabeaufforderung (Windows StartButton *Windows-System*|*Eingabeaufforderung*)



oder über eine PowerShell trittt dieses Problem nicht auf:



Für den Eingabestream *cin* ist der Eingabeoperator „>>“ definiert. Gibt man nach diesem Operator eine Variable an, wartet das Programm bei der Ausführung darauf, dass der Anwender einen Wert an der Konsole eintippt, und weist diesen dann der Variablen zu. Wie man Variablen definiert und verwendet, wird in Abschnitt 2.2 noch genauer beschrieben.

Durch das Programm

```
#include "stdafx.h"

#include <iostream> // für cin und cout notwendig
using namespace std;
```

```
int main()
{
    int x, y;
    cout << "x="; // der Anwender soll einen Wert eingeben
    cin >> x;      // den Wert einlesen
    cout << "y=";
    cin >> y;
    cout << "x+y=" << x + y << endl;
    return 0;
}
```

wird zunächst die Meldung „x=“ ausgegeben, und dann eine vom Benutzer eingegebene Zahl in der Variablen x gespeichert. Entsprechend auch für y. Danach wird die Summe der beiden Werte ausgegeben.

Mit dem Eingabeoperator kann man auch das Problem lösen, dass die Konsole nach dem Start mit F5 gleich wieder verschwindet: Man wartet einfach, dass der Benutzer einen Wert eingibt. Das erreicht man z.B. mit den Anweisungen vor return 0:

```
char c;
cin >> c;
return 0;
```

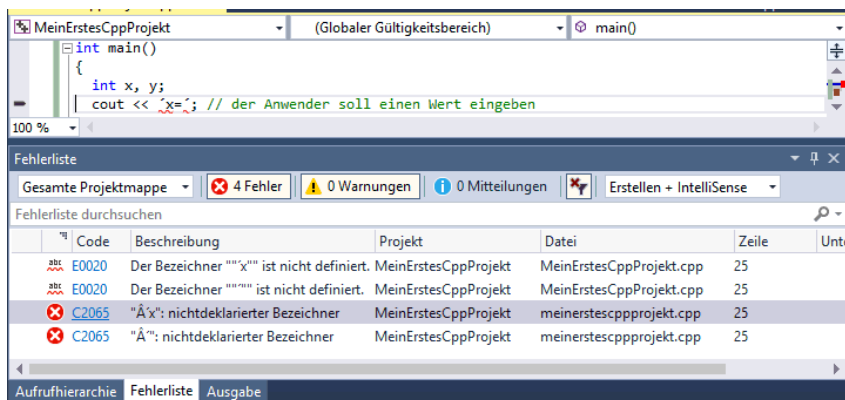
Zur Formatierung der Ausgabe kann man Manipulatoren (siehe Abschnitt 12.6) verwenden.

## Aufgabe 1.2.2

Schreiben Sie eine einfache Windows Konsolen-Anwendung, die den Text „Hello world“ am Bildschirm ausgibt.

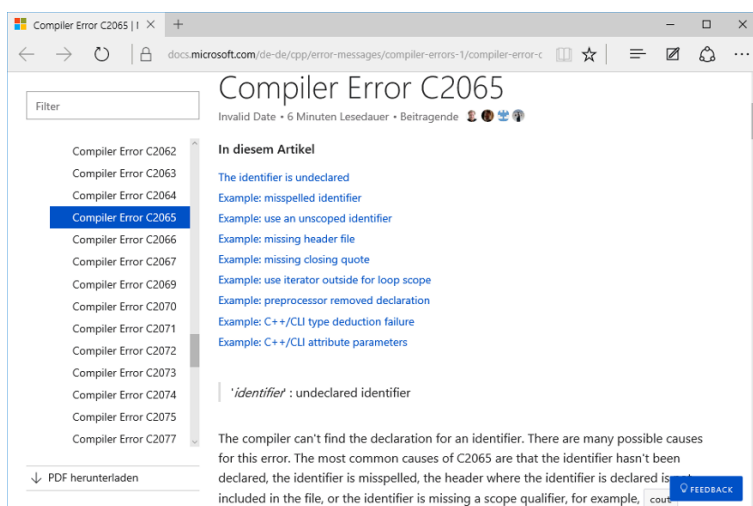
### 1.2.3 Fehler beim Kompilieren

Bei allen Anweisungen muss man die Sprachregeln von C++ genau einhalten. So muss man z.B. als Begrenzungszeichen für einen String das Zeichen " (Umschalt+2) verwenden und nicht eines der ähnlich aussehenden Akzentzeichen ` oder ´ bzw. das Hochkomma ' (Umschalt+#). Jedes dieser Zeichen führt bei der Übersetzung des Programms zu einer **Fehlermeldung des Compilers**:



Ein solcher Fehler bedeutet, dass der Compiler die angezeigte Anweisung nicht verstehen kann, weil sie die Sprachregeln von C++ nicht einhält. Ein Fehler zieht oft eine Reihe von Folgefehlern nach sich.

Mit einem Doppelklick auf eine Zeile der Fehlerliste springt der Cursor im Editor an die Stelle mit dem Fehler. Mit *F1* erhält man in der Fehlerliste noch eine ausführlichere Beschreibung des Fehlers.



Wenn Sie eine solche Fehlermeldung des Compilers erhalten, müssen Sie den Fehler im Quelltext beheben. Das kann vor allem für Anfänger eine mühselige Angelegenheit sein, insbesondere wenn die Fehlermeldung nicht so präzise auf den Fehler hinweist wie in diesem Beispiel. Da Fehler Folgefehler nach sich ziehen können, sollte man immer den Fehler zur ersten Fehlermeldung zuerst beheben.

**Manchmal** sind die **Fehlerdiagnosen** des Compilers sogar eher **irreführend** als hilfreich und schlagen eine falsche Therapie vor. Auch wenn Ihnen das kaum nützt: Betrachten Sie es als kleinen Trost, dass die Fehlermeldungen in anderen Programmiersprachen (z.B. in C) oft

noch viel irreführender sind und schon so manchen Anfänger völlig zur Verzweiflung gebracht haben.

### 1.2.4 Den Quelltext auf Header-Dateien aufteilen

Damit die Quelltextdateien nicht zu umfangreich und unübersichtlich werden, empfiehlt es sich, diese auf verschiedene Dateien aufzuteilen. Eine solche Aufteilung wird für alle größeren **Projekte** und insbesondere auch für die Lösungen der **Übungsaufgaben** in diesem Buch empfohlen.

Dazu kann man folgendermaßen vorgehen:

1. Mit *Datei|Neu|Projekt|Visual C++|Windows-Konsolenanwendung* (siehe Abschnitt 1.2.1) ein neues Projekt anlegen. Bei den folgenden Beispielen wird ein Projekt mit dem Namen *MeinProjekt* angenommen.
2. Die Funktionen, Deklarationen, Klassen usw. kommen in eine eigene Datei, die dem Projekt mit *Projekt|Neues Element hinzufügen|Visual C++|Code als Headerdatei(.h)* mit einem passenden Namen (z.B. *MeinHeader.h*) hinzugefügt wird. Diese Datei wird dann vor der *main*-Funktion und nach *#include "stdafx.h"* mit einer *#include*-Anweisung in *cpp*-Datei des Projekts aufgenommen:

```
#include "stdafx.h"
#include <iostream> // für cin und cout notwendig
#include "MeinHeader.h"
int main()
{
...
}
```

Im Prinzip hat die *#include*-Anweisung (siehe Abschnitt 2.11.1) der Header-Datei von 3. denselben Effekt, wie wenn man die Anweisungen der Header-Datei an der Stelle der *#include*-Anweisung in das Programm aufnimmt.

Damit auch in der Header-Datei Daten mit *cin* und *cout* ein- und ausgegeben werden können, wird auch in diese Datei am Anfang

```
#include <iostream> // für cin und cout notwendig
```

eingefügt.

Nimmt man in eine solche Header-Datei die Funktion

```
int plus1(int x)
{
    return x + 1;
}
```

auf, kann man diese in der *main*-Funktion aufrufen und das Ergebnis anzeigen:

```
int main()
{
    cout << "17+1=" << plus1(17) << endl; // 17+1=18
    ...
}
```

Bei großen Projekten ist oft eine differenziertere Aufteilung auf Dateien empfehlenswert: In die Header-Dateien werden nur die Deklarationen und in die cpp-Dateien nur die Definitionen aufgenommen. Diese Vorgehensweise hat aber zur Folge, dass man nach jeder Änderung einer Parameterliste in der cpp-Datei die Parameterliste in der Header-Datei anpassen muss. Das ist recht umständlich und führt zu Fehlermeldungen, wenn es vergessen wird. In Abschnitt 8.2.16 wird gezeigt, wie man eine solche Aufteilung mit Unterstützung von Visual Studio leicht durchführen kann.

### 1.2.5 Ein Projekt für die Lösung der Übungsaufgaben

Die in Abschnitt 1.2.4 beschriebene Aufteilung von Funktionen auf verschiedene Header-Dateien kann auch für die Lösungen der Übungsaufgaben in diesem Buch sinnvoll sein. Wenn man für jede Aufgabe ein eigenes Projekt anlegt, hat man bereits nach Kapitel 2 eine unübersichtlich große Anzahl von Projekten.

Deswegen wird empfohlen, einige oder sogar alle Lösungen eines Kapitels in eine einzige Header-Datei zu schreiben: Für jede Lösung einer Aufgabe werden eine oder mehrere Funktionen geschrieben und diese dann in der *main*-Funktion aufgerufen. Dann kann eine solche Datei zwar auch ziemlich groß werden, wenn Sie viele Aufgaben machen. Aber man kann leicht zu den Lösungen von anderen Aufgaben blättern und sich davon anregen lassen. Mit Namensbereichen (siehe Abschnitt 2.10) kann man eine Header-Datei gut gliedern und die Übersichtlichkeit steigern.

Auf diese Empfehlung wird bei den ersten Aufgaben hingewiesen, später dann nicht mehr.

Der Aufwand, diese Funktionen mit Werten zu testen, die von einem Benutzer über die Konsole eingegeben werden, ist relativ groß. Deshalb reicht es bei vielen Übungsaufgaben aus, diese Funktionen mit hartkodierten Werten aufzurufen:

```
int main()
{
    cout << "plus1(1)=" << plus1(1) << endl;
    cout << "plus1(2)=" << plus1(2) << endl;
    cout << "plus1(3)=" << plus1(3) << endl;
}
```

Ein Programm ist aber flexibler, wenn die Eingabewerte eingelesen werden:

```
int main()
{
    int n;
    cout << "n=";
    cin >> n;
    cout << n<<" +1=" << plus1(n) << endl;
}
```

Das Programm wird noch flexibler, wenn mehrere Optionen angeboten werden:

```

int main()
{
    int n, m;
    do {
        cout << "plus1 (1)" << endl;
        cout << "plus2 (2)" << endl;
        cout << "Programmende (0)" << endl;
        cin >> m;
        if (m == 1)
        {
            cout << "n=";
            cin >> n;
            cout << n << "+1=" << plus1(n) << endl; // 17+1=18
        }
        else if (m==2)
        {
            cout << "n=";
            cin >> n;
            cout << n << "+1=" << plus2(n) << endl; // 17+2=19
        }
    } while (m == 0);
}

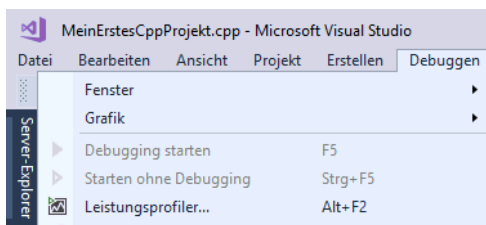
```

Da der Schreibaufwand für eine solche Menüstruktur relativ groß ist, kann in den Lösungen der Übungsaufgaben auch darauf verzichtet werden.

### 1.2.6 An einem Projekt weiterarbeiten

Wenn man an einem **Projekt weiterarbeiten** will, das man zu einem früheren Zeitpunkt begonnen hat, kann man im Windows Explorer die Projektdatei mit der Namensendung *\*.sln* oder *\*.vcproj* öffnen. Da das Projektverzeichnis aber auch noch viele andere Dateien enthält, besteht die Gefahr, dass man eine andere Datei anklickt und dann nicht das Projekt, sondern nur die Datei geöffnet wird.

Das hat dann zur Folge, dass z.B. die Option *Debuggen|Start Debugging* ausgegraut ist:



Diese Gefahr besteht mit *Datei|zuletzt geöffnete Projekte* oder *Datei|Öffnen|Projekt* nicht. Hier werden nur Projekte angeboten.

### 1.2.7 Der Start des Compilers von der Kommandozeile Ø

Der C++-Compiler von Visual Studio kann nach einem Aufruf von



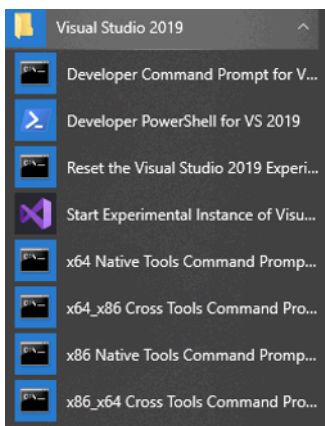
```
"C:\Program Files (x86)\Microsoft Visual Studio\2019\Community\
Common7\Tools\vsdevcmd\ext\vcvars.bat"
```

unter dem Namen *cl* auch von einer Kommandozeile aus (z.B. *Start|Programme|Zubehör|-Eingabeaufforderung* oder *Take Command* (<http://www.jpsoft.com>)) gestartet werden:

```
cl test.cpp
```

Die zahlreichen Parameter erhält man mit der Option */?* (z.B. */D* für Präprozessor-Makros und */I* für *#include*-Suchpfade).

Eine solche Konsole kann man auch von Windows 10 aus mit einer „Developer Command Prompt“ starten:



## Aufgabe 1.2

Erstellen Sie wie im Text ein Projekt mit dem Namen *MeinErstesCppProjekt*, das eine Header-Datei mit einer Funktion enthält (z.B. *plus1*), die in der *main*-Funktion mit einem Argument aufgerufen wird. Das Ergebnis von *plus1* soll dann auf der Konsole angezeigt werden.

Alle Lösungen der Übungsaufgaben in diesem Buch können in eine Header-Datei eines Projekts aufgenommen werden, das so aufgebaut ist.

## 1.3 Der Quelltexteditor

Der Quelltexteditor (kurz: **Editor**) ist das Werkzeug, mit dem die Quelltexte geschrieben werden. Er ist in die Entwicklungsumgebung integriert und kann z.B. über *Ansicht|Code* aufgerufen werden.

### 1.3.1 Tastenkombinationen

Der Editor enthält über Tastenkombinationen zahlreiche Funktionen, mit denen sich nahezu alle Aufgaben effektiv durchführen lassen, die beim Schreiben von Programmen auftreten.

Die nächste Tabelle enthält Funktionen, die vor allem beim Programmieren nützlich sind, und die man in einer allgemeinen Textverarbeitung nur selten findet. Die meisten dieser Optionen werden auch unter *Bearbeiten*|*Erweitert* sowie auf der *Text Editor* Symbolleiste (unter *Ansicht*|*Symbolleisten*) angezeigt:

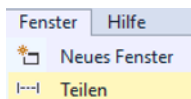
| Tastenkürzel                                                                                                                                                                                                                 | Aktion oder Befehl                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>F5</i> bzw.                                                                                                                              | kompilieren und starten, wie <i>Debuggen</i>   <i>Debugging Starten</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <i>Umschalt+F5</i>                                                                                                                                                                                                           | Laufendes Programm beenden, wie <i>Debuggen</i>   <i>Debugging beenden</i> . Damit können auch Programme beendet werden, die mit  nicht beendet werden können. Versuchen Sie immer zuerst diese Option wenn Sie meinen, Sie müssten Visual Studio mit dem Windows Task Manager beenden. |
| <i>F1</i>                                                                                                                                                                                                                    | kontextsensitive Hilfe (siehe Abschnitt 1.5)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <i>Strg + '</i><br>( ' ist das Zeichen links von der Rücktaste)                                                                                                                                                              | setzt den Cursor vor die zugehörige Klammer, wenn er vor einer Klammer (z.B. (), {}, [ ] oder <>) steht                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <i>Umschalt+Strg + '</i>                                                                                                                                                                                                     | markiert den Bereich zwischen den Klammern außerdem noch                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <i>Strg+M+M</i> bzw. unter <i>Bearbeiten</i>   <i>Gliedern</i>                                                                                                                                                               | ganze Funktionen, Klassen usw. auf- oder zuklappen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <i>Alt+Maus</i> bewegen bzw.<br><i>Alt+Umschalt+Pfeiltaste</i> (←, →, ↑ oder ↓)                                                                                                                                              | zum Markieren von Spalten, z.B.<br><pre> /// &lt;summary&gt; /// Clean up any /// &lt;/summary&gt; /// &lt;param name= </pre>                                                                                                                                                         |
| <i>Strg+K+C</i> oder<br><i>Strg+K+U</i> bzw.<br> oder  | einen markierten Block auskommentieren bzw. die Auskommentierung entfernen                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Rechte Maustaste<br><i>Dokument öffnen</i>                                                                                                                                                                                   | öffnet in einer Zeile mit einer <i>#include</i> -Anweisung die angegebene Datei                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

Eine ausführliche Liste der Tastenkombinationen findet man in der Microsoft-Dokumentation (siehe Abschnitt 1.5) mit dem Suchbegriff „Visual Studio Tastenkombinationen“.

Weitere Möglichkeiten des Editors, die gelegentlich nützlich sind:

- Die Schriftgröße kann man mit *Strg+Mausrad* vergrößern und verkleinern.

- Wenn man verschiedene Teile eines Textes in verschiedenen Fenstern anschauen (und z.B. vergleichen will), kann man die aktuelle Datei in verschiedenen Fenstern öffnen:



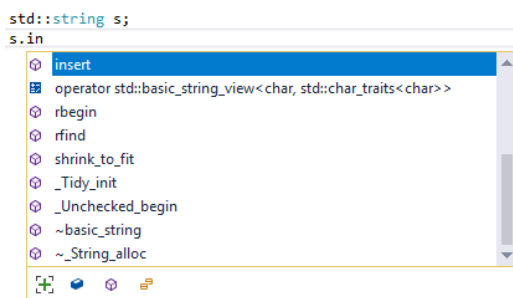
### 1.3.2 Intellisense

Die folgenden Programmierhilfen beruhen auf einer Analyse des aktuellen Programms. Sie werden zusammen mit einigen weiteren (siehe *Bearbeiten|IntelliSense*) unter dem Oberbegriff **Intellisense** zusammengefasst:

- Der Editor bietet fast jederzeit eine Auswahl von **zulässigen Sprachelementen** an.
- **Elemente anzeigen und auswählen:** Nachdem man den Namen einer Variablen eines Klassentyps (bzw. eines Zeigers auf ein solche Variable, bzw. den Namen eines Namensbereichs) und einen zugehörigen Operator (z.B. „`„`“, „`„>`“, „`„::`“ usw.) eingetippt hat, wird eine Liste mit allen Elementen der Klasse oder des Namensbereichs angezeigt. Aus dieser Liste kann man mit der Enter-Taste ein Element auswählen.
- **Parameter Info:** Zeigt nach dem Eintippen eines Funktionsnamens und einer öffnenden Klammer die Parameter der Funktion an
- **Quick Info:** Wenn man mit der Maus über einen Namen für ein zuvor deklariertes Symbol fährt (bzw. mit *Strg+K+I*), wird die Deklaration angezeigt. Bei einer vordefinierten Funktion wird außerdem eine Beschreibung angezeigt.

Beispiel: Wenn `s` eine Variable des Klassentyps `std::string` ist, wird nach dem Eintippen von „`s.`“ eine Liste mit allen Elementen des Strings angezeigt.

Tippt man weitere Buchstaben ein, werden nur die Elemente angezeigt, die diese Zeichenfolge enthalten. In einem weiteren Fenster werden außerdem der Datentyp und eine kurze Beschreibung der Eigenschaft angezeigt.



Unterbricht man die Eingabe einer Zeichenfolge (z.B. weil man die Zeile verlässt und anschließend wieder zurückkehrt), bietet Intellisense keine Vorschläge an. Mit *Strg+Leerzeichen* werden dann wieder Vorschläge angezeigt.

Falls der Editor einen **Syntaxfehler** entdeckt, zeigt er das mit einer rot unterstrichenen Wellenlinie an (wie bei Rechtschreibfehlern in Word).

### 1.3.3 Die Formatierung des Quelltexts

Nach dem Eintippen eines Zeichens, das für den Editor ein Hinweis auf das Ende einer Anweisung, eines Blocks usw. ist (z.B. nach einem Semikolon oder einer schließenden geschweiften Klammer „}“), „verschönert“ der Editor das Layout. Tippt man z.B.

```
int x=17
```

macht der Editor daraus mit dem Eintippen des „;“

```
int x = 17;
```

Diese automatische Formatierung erfolgt aber nur bei dem Eintippen eines abschließenden Symbols. Entfernt man die Leerzeichen anschließend wieder, wird der Text nicht erneut formatiert.

Mit *Bearbeiten|Erweitert|Dokument formatieren* oder *Strg+K+D* kann man den Text jederzeit formatieren lassen. Damit wird z.B. aus

```
int main()
{
    int x =17;
        x = x + 1;
    cout << x << endl;
}
```

dieser Text

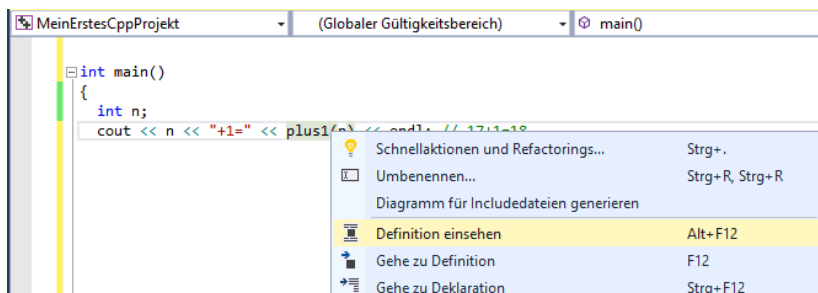
```
int main()
{
    int x = 17;
    x = x + 1;
    cout << x << endl;
}
```

bei dem die Anweisungen einer Funktion in derselben Spalte beginnen.

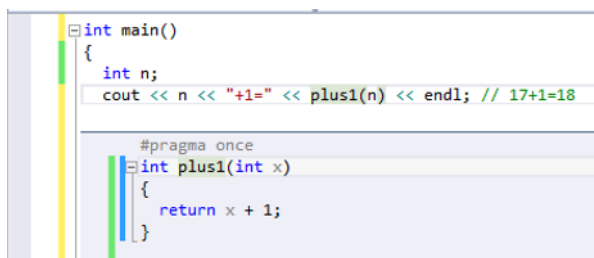
Unter *Extras|Optionen|Text-Editor|C/C++|Formatierung* gibt es zahlreiche Möglichkeiten, das so erzeugte Layout zu gestalten.

### 1.3.4 Definitionen einsehen

Beim Aufruf einer Funktion oder der Verwendung einer Variablen besteht immer wieder die Notwendigkeit, die Definition einer Funktion bzw. Variablen anzuschauen. Das ist mit der Option *Definition einsehen* aus dem Kontextmenü zu einer Anweisung besonders einfach, da sie das Suchen und Blättern im Quelltext erspart und man nicht einmal die aktuelle Position im Editor verlassen muss:



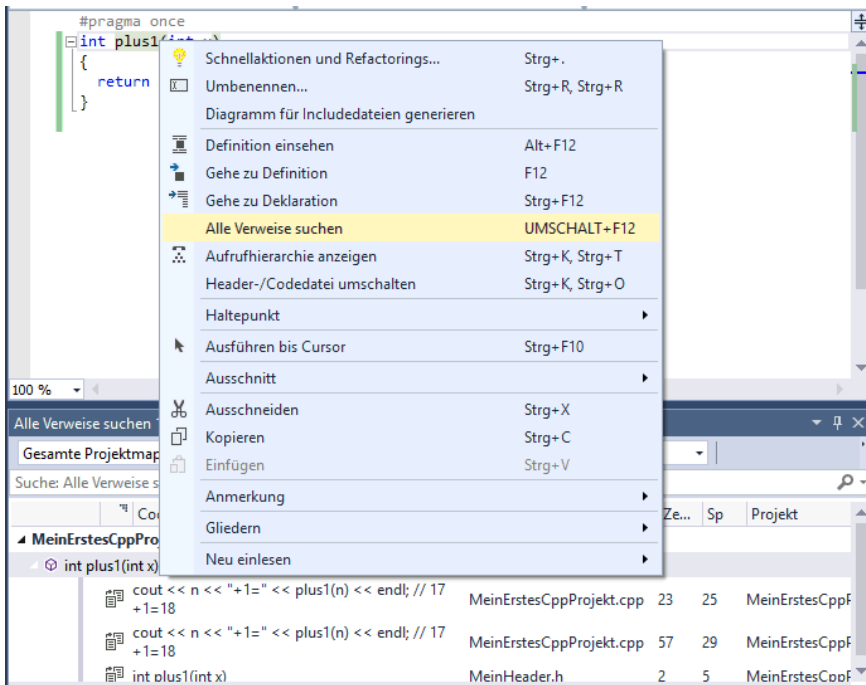
Damit wird ein Fenster mit dem Quelltext eingeblendet, indem man sogar Änderungen vornehmen kann.



Falls man trotzdem noch zur Definition oder Deklaration gehen will, ist das *Gehe zu Definition* bzw. *Gehe zu Deklaration* aus dem Kontextmenü möglich.

### 1.3.5 Symbole suchen

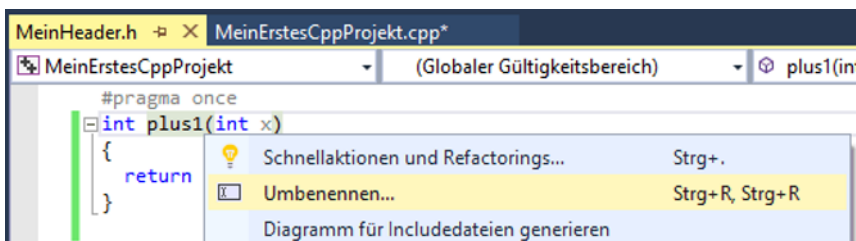
Alle Aufrufe einer Funktion bzw. alle Stellen, an denen eine Variable verwendet wird, kann man mit der Option „Alle Verweise suchen“ aus dem Kontextmenü im Editor anzeigen lassen:



Die Treffer sind hiermit viel präziser als mit *Bearbeiten|Suchen* von Abschnitt 1.3.7. Insbesondere werden keine Kommentare und Strings gefunden, die den gesuchten Namen enthalten.

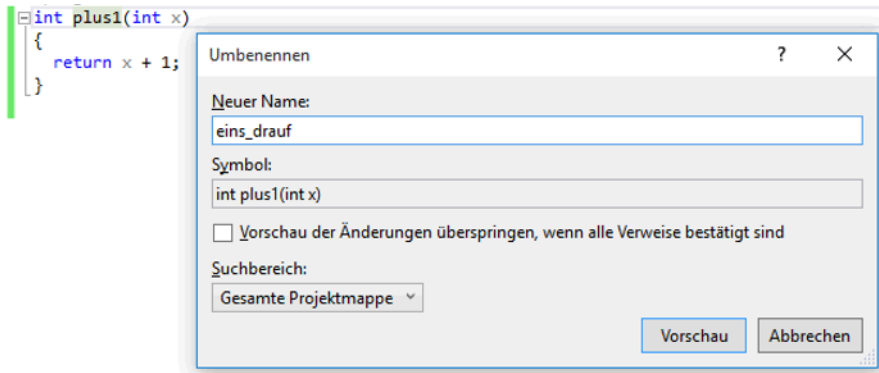
### 1.3.6 Namen umbenennen

Ab Visual Studio 2015 kann man Namen, die in C++ definiert wurden (Namen von Variablen, Funktionen, Klassen usw.), mit der im Kontextmenü des Editors verfügbaren Option *Umbenennen* einfacher und sicherer umbenennen:

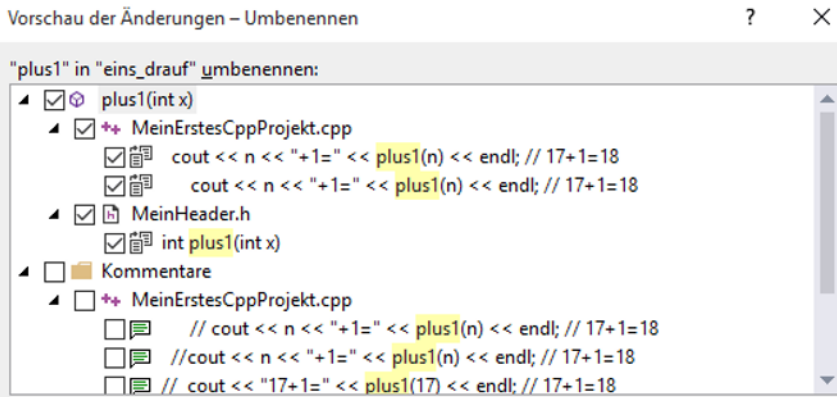


Da die meisten Zeichenfolgen, die man in einem Programm ersetzen will, solche Namen sind, ist die *Bearbeiten|Ersetzen*-Option nur noch selten notwendig.

Klickt man im Editor mit der rechten Maustaste den Namen einer Variablen, Funktion usw. an, wird im Kontextmenü die Option *Umbenennen* angeboten, mit der man diese Variable, Funktion usw. im gesamten Quelltext umbenennen kann:



Wenn der Name anders verwendet wird (z.B. für eine andere Variable mit demselben Namen), wird er nicht geändert. Vor der Durchführung der Änderungen kann man eine Vorschau anzeigen lassen:

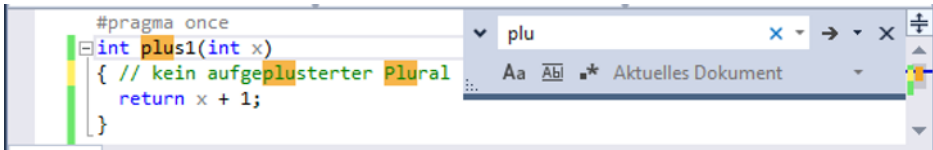


Hier kann man im oberen Fenster noch korrigieren, ob der Name von anderen Variablen oder in Kommentaren doch geändert werden soll.

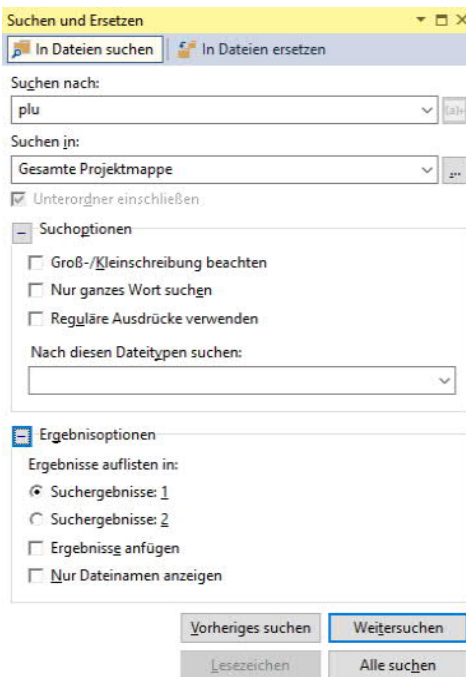
### 1.3.7 Zeichenfolgen suchen und ersetzen

Die im Folgenden beschriebenen Möglichkeiten bestehen schon seit den ersten Versionen von Visual Studio. Da sie auf Zeichenfolgen und nicht auf Symbolen (wie die neueren Möglichkeiten der Abschnitte 1.3.4, 1.3.5 und 1.3.6) beruhen, sind sie den neueren Möglichkeiten meist unterlegen. Trotzdem gibt es noch Situationen, in denen sie benötigt werden.

Mit *Bearbeiten|Suchen und Ersetzen|Schnellsuche* bzw. mit *Strg+F* kann man nach einer Zeichenfolge im Text oder in einer Datei suchen. Ruft man diese Option vom Editor aus auf, wird der Dialog zur Eingabe des gesuchten Ausdrucks rechts oben im Editor-Fenster angezeigt (siehe linke Abbildung). Er kann nicht verschoben werden.



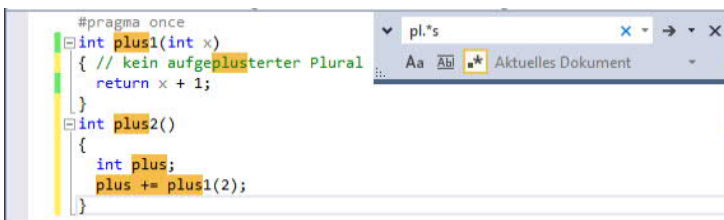
Beim Aufruf von einem anderen Fenster (z.B. der Fehlerliste) erhält man dagegen den übersichtlicheren Dialog, den man auch andocken kann:



Klickt man auf den Weitersuchen-Pfeil, werden die Textstellen, die zu dem Suchmuster passen, farbig unterlegt.

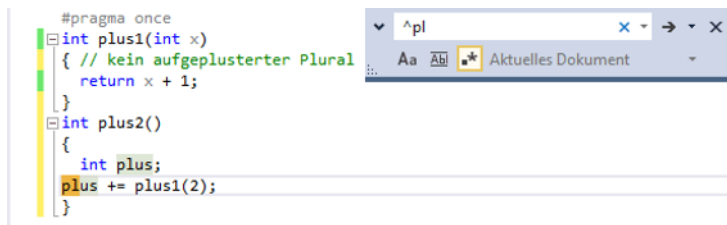
Mit dem Button  bzw. mit „Reguläre Ausdrücke verwenden“ kann man auch nach einem Muster suchen, das als regulärer Ausdruck angegeben wird. Die Syntax für reguläre Ausdrücke erlaubt komplexe Suchmuster und soll nur an zwei Beispielen illustriert werden.

1. `ab.*xyz` passt zu jeder Zeichenfolge, die zwischen `ab` und `xyz` beliebige Zeichen enthält (Wildcard):

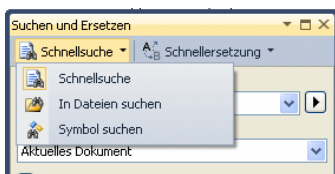




2. ^xyz passt zu jeder Zeile, die in der ersten Spalte mit xyz beginnt:



Über das Menü oben links in *Suchen und Ersetzen* kann man nicht nur im aktuellen Text oder Projekt, sondern auch in Dateien suchen:



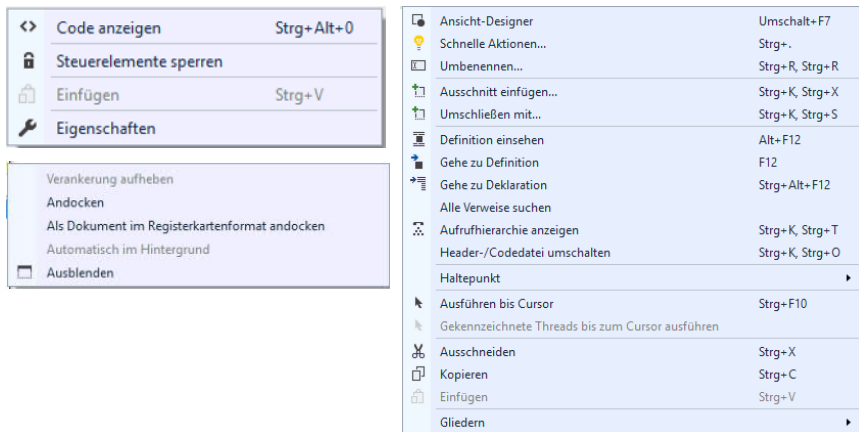
Mit den Ersetzen-Optionen unter *Bearbeiten|Suchen und Ersetzen* kann man auch Zeichenfolgen ersetzen. Damit besteht aber die Gefahr, dass auch Zeichenfolgen ersetzt werden, die eine andere Variable darstellen.

## 1.4 Kontextmenüs und Symbolleisten

Einige der häufiger gebrauchten Menüoptionen stehen auch über Kontextmenüs und Symbolleisten zur Verfügung. Damit kann man diese Optionen etwas schneller auswählen als über ein Menü.

Über die rechte Maustaste erhält man in den meisten Fenstern von Visual Studio ein sogenanntes **Kontextmenü** (auch die Bezeichnung „**lokales Menü**“ ist verbreitet), das eine Reihe gebräuchlicher Optionen für dieses Fenster anbietet.

Beispiele: In einem **Formular** erhält man das Kontextmenü links oben, mit dessen erster Option man in den Editor kommt. Im Kontextmenü des **Quelltexteditors** (Abbildung rechts) kann man mit der ersten Option ins Formular wechseln. Das Kontextmenü in der **Titelzeile** der meisten Fenster bietet Möglichkeiten zur Gestaltung der Entwicklungsumgebung.



Eine **Symbolleiste** (Toolbar) ist eine Leiste mit grafischen Symbolen (Icons), die unterhalb der Menüleiste angezeigt wird. Diese Symbole stehen für Optionen, die auch über die Menüleiste verfügbar sind. Durch das Anklicken eines Symbols kann man sie mit einem einzigen Mausklick auswählen. Das ist etwas schneller als die Auswahl über ein Menü, die mindestens zwei Mausklicks erfordert. Symbolleisten können außerdem zur Übersichtlichkeit beitragen, da sie Optionen zusammenfassen, die inhaltlich zusammengehören.

Visual Studio enthält einige vordefinierte Symbolleisten. Mit *Ansicht|Symbolleisten* kann man diejenigen auswählen, die man gerade braucht, sowie eigene Symbolleisten konfigurieren. Einige Optionen der *Text-Editor* Symbolleiste wurden schon im Zusammenhang mit dem Editor vorgestellt.

Falls Ihnen die relativ kleinen Symbole nicht viel sagen, lassen Sie den Mauszeiger kurz auf einer Schaltfläche stehen. Dann wird die entsprechende Option in einem kleinen Fenster beschrieben.

Eigene Symbolleisten können mit *Ansicht|Symbolleisten|Anpassen* auf der Seite *Symbolleisten* mit *Neu* angelegt werden. In eine eigene oder vordefinierte Symbolleiste kann man dann von der Seite *Ansicht|Symbolleisten|Anpassen|Symbolleisten* durch Ziehen mit der Maus Befehle einfügen.

## 1.5 Online-Dokumentation

Da sich kaum jemand die vielen Einzelheiten von Visual Studio, C++ usw. merken kann, ist es für eine effektive Arbeit **unerlässlich**, die zugehörige Dokumentation nutzen zu können.

### 1.5.1 Die Microsoft-Dokumentation

Die Microsoft Dokumentation steht im Internet unter <https://docs.microsoft.com> zur Verfügung, insbesondere

<https://docs.microsoft.com/en-us/cpp/standard-library/stl-containers?view=vs-2019>  
<https://docs.microsoft.com/en-us/cpp/cpp/cpp-language-reference?view=vs-2019>

Die Vorgängerversion „Microsoft Developer Network“ msdn.microsoft.com ist seit Dezember 2019 nicht mehr verfügbar.

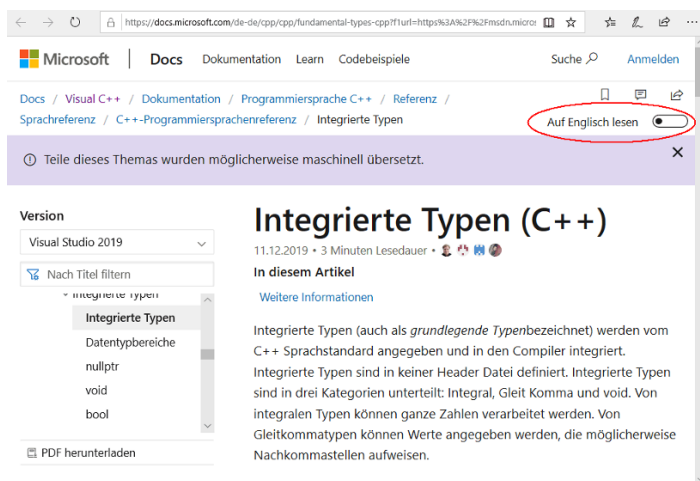
Da Microsoft die Dokumentation immer wieder verändert, können die folgenden Ausführungen von der tatsächlichen Darstellung abweichen.

Am einfachsten ist oft die **kontextbezogene Hilfe mit *F1***: In den meisten Fenstern der Entwicklungsumgebung erhält man mit *F1* Informationen, wie z.B.

- im Editor zum Wort unter dem Cursor,
- in Visual Studio zu dem gerade aktiven Element

Beispiele:

- Drückt man die Taste *F1*, während sich der Cursor **im Editor** auf dem Wort *int* befindet, erhält man eine Beschreibung des Datentyps *int*:



Da die maschinelle Übersetzung ins Deutsche gelegentlich irreführend ist, kann der englische Text besser sein.

- Drückt man *F1*, während gerade der Projektmappen-Explorer aktiviert ist, erhält man eine Beschreibung des Projektmappen-Explorers.

Gibt man unter „Suche“ den Suchbegriff „int“ ein, erhält man viel zu viele Treffer (Stand April 2020):

Microsoft | Docs Windows Azure Visual Studio Office Microsoft 365 .NET Mehr ▾ Suche 🔍

Docs / Suche

All (22.207) Documentation (11.022) Learn (5) Reference (11.180)

22.207 results for "int"

RSS

### [int, bigint, smallint und tinyint \(Transact-SQL\) - SQL Server](#)

[/sql/t-sql/data-types/int-bigint-smallint-and-tinyint-transact-sql](#)

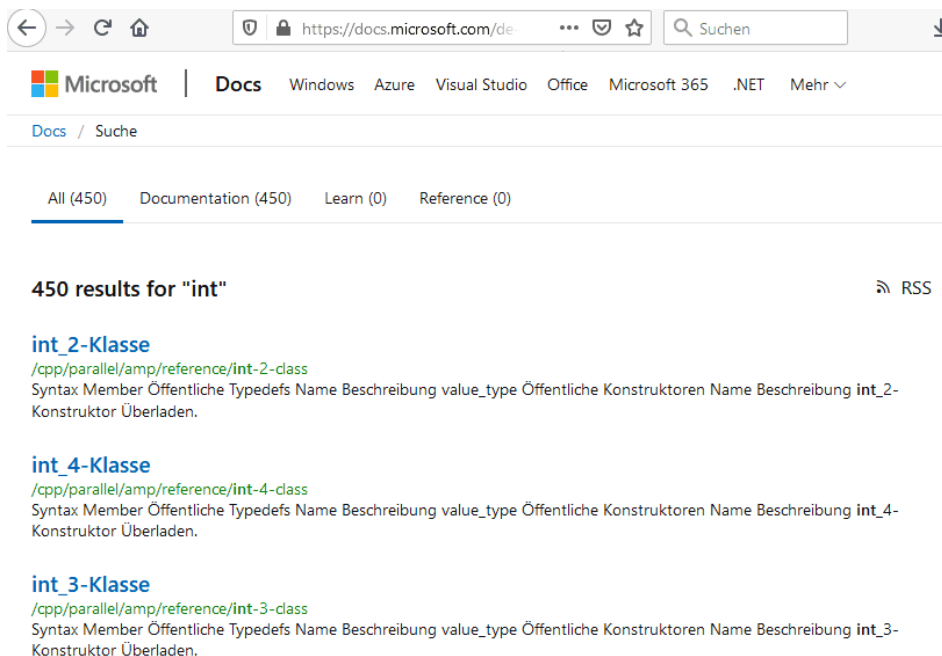
SQL Server stuft andere Integerdatentypen (tinyint, smallint und int) nicht automatisch auf bigint herauf. ... Beispiele Im folgenden Beispiel wird eine Tabelle mit den Datentypen bigint, int, smallint und tinyint erstellt.

Diese Treffer lassen sich etwas einschränken, wenn man links auf „Docs“ klickt und dann auf C++:

## Dokumentverzeichnis

|                                           |                                                   |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| <a href="#">.NET</a>                      | <a href="#">Internet Information Services</a>     |
| <a href="#">ASP.NET</a>                   | <a href="#">Microsoft 365 Business</a>            |
| <a href="#">Azure</a>                     | <a href="#">Microsoft 365 Enterprise</a>          |
| <a href="#">Azure Architecture Center</a> | <a href="#">Microsoft Advertising</a>             |
| <a href="#">Azure Bot Service</a>         | <a href="#">Microsoft Bildung</a>                 |
| <a href="#">Azure DevOps</a>              | <a href="#">Microsoft FastTrack</a>               |
| <a href="#">Azure IoT Central</a>         | <a href="#">Microsoft Forms Pro</a>               |
| <a href="#">Bing Karten</a>               | <a href="#">Microsoft Graph</a>                   |
| <a href="#">Biztalk Server</a>            | <a href="#">Microsoft HPC Pack 2016</a>           |
| <a href="#">C++</a>                       | <a href="#">Microsoft Kaizala</a>                 |
| <a href="#">C#</a>                        | <a href="#">Microsoft Machine Learning-Server</a> |

Gibt man dann den Suchbegriff „int“ ein, erhält man deutlich weniger, aber immer noch zu viele Treffer:



Die ersten dieser Treffer betreffen sehr spezielle Anwendungsfälle und sind normalerweise nicht hilfreich.

Deutsche Übersichtsartikel findet man oft mit einem Suchbegriff wie

vector gewusst wie

und englische mit „vector how to“.

### 1.5.2 en.cppreference.com

Diese Seiten gehören zu den besten Dokumentationen über C++. Die Beschreibungen sind sehr präzise, allerdings oft auf einem Niveau, das Anfänger überfordert.

## 1.6 Projekte und der Projektmappen-Explorer

Visual Studio erzeugt eine ausführbare Anwendung aus verschiedenen Dateien, die zusammenfassend als **Projekt** bezeichnet werden. Einige dieser Dateien werden nach *Datei|-Neu|Projekt* erzeugt. Andere werden durch Aktionen wie *Debuggen|Debugging Starten* oder *Erstellen* erzeugt. Sie befinden sich in dem als *Projektmappenname* angegebenen Unterverzeichnis von *Speicherort*, sowie in Unterverzeichnissen davon, die dem Namen des Projekts entsprechen. In der Voreinstellung ist *Projektmappenname* der Name des Projekts.

### 1.6.1 Projekte, Projektdateien und Projektoptionen

Zu einem Projekt mit dem Namen *MeinProjekt*, das in einer Projektmappe mit dem Namen *MeineSolution* enthalten ist, gehören unter anderem die folgenden Dateien im Verzeichnis *MeineSolution\MeinProjekt*:

**MeinProjekt.vcxproj** enthält Informationen über die verwendete Version von Visual Studio, die gewählte Plattform, die gewählten Projektoptionen usw.

**MeinProjekt.cpp** enthält die *main*-Funktion der Anwendung. Diese Funktion wird beim Start der Anwendung aufgerufen

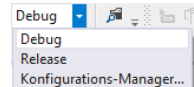
```
#include "stdafx.h"

#include <iostream> // für cin und cout notwendig
using namespace std;

int main()
{
    cout << "Hallo Welt" << endl;
    return 0;
}
```

**StdAfx.h, StdAfx.cpp:** Diese Dateien werden zur Erzeugung einer vorkompilierter Header-Datei (PCH) verwendet, die der Beschleunigung der Kompilierung dient. Alle Anweisungen bis zu einer *#include "stdafx.h"*-Anweisung werden vorkompiliert (d.h. nur einmal kompiliert). Fügt man später vor dieser *#include*-Anweisung noch Anweisungen ein, werden diese nicht kompiliert.

In der Symbolleiste *Standard* kann man auswählen, ob eine Anwendung als **Debug**- oder **Release**-Version erzeugt werden soll. Die Debug-Version ist nicht optimiert und enthält Debug-Informationen, mit denen man sie im Debugger (siehe Abschnitt 2.6.1) ausführen kann. Das ist normalerweise die richtige Wahl während man eine Anwendung entwickelt, oder wenn man programmiert, um das Programmieren zu lernen. Die Release-Version ist dagegen optimiert, enthält aber keine Debug-Informationen. Sie ist die richtige Wahl, wenn die Entwicklung einer Anwendung abgeschlossen ist und sie in Betrieb genommen werden soll. Die ausführbaren Dateien befinden sich in den Unterverzeichnissen „Debug“ oder „Release“ des Projektmappenverzeichnisses. Unter *Projekt|Eigenschaften|Konfiguration* kann man die Einstellungen für diese und weitere Konfigurationen (die mit dem Konfigurations-Manager angelegt werden können) setzen.



In Abhängigkeit von der *Debug* oder *Release* Konfiguration erzeugt der Compiler in den Unterverzeichnissen *Debug* oder *Release* des Projekts **Objektdateien** mit der Endung „.obj“. Aus diesen Objektdateien erzeugt der **Linker** dann in diesen Unterverzeichnissen das ausführbare Programm mit der Endung „.exe“. Der Linker ist wie der Compiler ein in die Entwicklungsumgebung integriertes Programm, das automatisch beim Erzeugen eines Programms (z.B. mit *F5*) ausgeführt wird. Bei vielen Visual Studio Projekten braucht man allerdings nicht einmal zu wissen, dass der Linker überhaupt existiert. Normalerweise ist es

kein Fehler, wenn man sich vorstellt, dass das ausführbare Programm allein vom Compiler erzeugt wird.

Die Dateien eines Projekts werden von Visual Studio vor dem Erstellen (z.B. mit *F5*) automatisch **gespeichert**, wenn unter *Extras|Optionen|Projekte und Projektmappen|Allgemein* die Einstellung *Neue Projekte beim Erstellen speichern* markiert ist (Voreinstellung). Man kann sie außerdem mit *Datei|Alle speichern* speichern.

Diese Dateien belegen auch bei kleinen Projekten mehr als 10 MB. Ein Teil dieser Dateien wird bei jeder Kompilation neu erzeugt und kann mit *Erstellen|Projektmappe bereinigen* gelöscht werden. Aber auch danach belegen die verbleibenden Dateien mehrere MB.

### 1.6.2 Projektmappen und der Projektmappen-Explorer

Eine **Projektmappe** (in der englischen Version „Solution“) fasst ein oder mehrere Projekte zusammen und ermöglicht, diese gemeinsam zu bearbeiten, zu verwalten und zu konfigurieren.

Falls man ein neues Projekt mit *Datei|Neu|Projekt* anlegt, ist der *Projektmappenname* in der Voreinstellung derselbe Name wie der des Projekts. Man kann aber auch einen anderen Namen für die Projektmappe wählen oder mit *Datei|Hinzufügen* ein Projekt zu einer Projektmappe hinzufügen. Nachdem man eine Projektmappe angelegt hat, kann man außerdem mit dem **Projektmappen-Explorer** (*Ansicht|Projektmappen-Explorer*) nach einem Klick auf die rechte Maustaste ein vorhandenes oder ein neues Projekt hinzufügen.

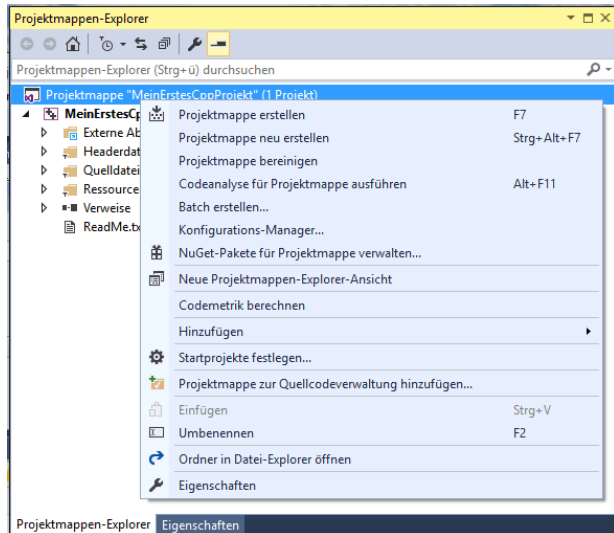
Alle Projekte einer Projektmappe werden durch die Optionen des *Erstellen* Menüs erzeugt:

- *Erstellen|Projektmappe erstellen* kompiliert und linkt alle Dateien, die seit dem letzten Build verändert wurden.
- *Erstellen|Projektmappe neu erstellen* kompiliert und linkt alle Dateien, unabhängig davon, ob sie geändert wurden oder nicht.
- *Erstellen|Projektmappe bereinigen* entfernt alle Dateien, die beim nächsten Build wieder erzeugt werden.

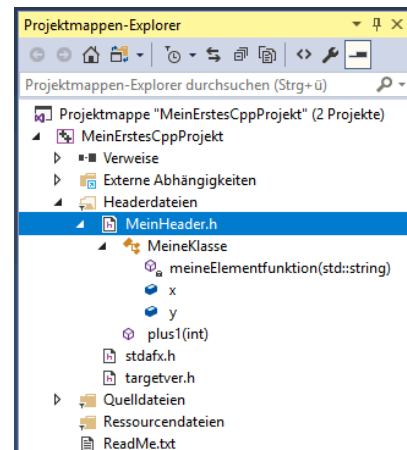
Der Projektmappen-Explorer enthält zahlreiche verschiedene Kontextmenüs, je nachdem, ob man eine Projektmappe, ein Projekt usw. anklickt. Mit ihnen kann man steuern, wie Projekte erzeugt und ausgeführt werden. Insbesondere kann man damit:

- mit „Startprojekte festlegen“ das Projekt auswählen, das mit dem nächsten *Debugging starten* (F5) erzeugt und ausgeführt wird (das **Startprojekt**).
- Projekte zu einer Projektmappe hinzufügen oder aus ihr entfernen. Entsprechende Operationen stehen für die Dateien eines Projekts zur Verfügung.
- über *Eigenschaften* Abhängigkeiten für die Projekte einer Projektmappe oder die Dateien eines Projekts festlegen.

Einige der Optionen für ein Projekt stehen auch über das Projekt-Menü zur Verfügung.



Im Projektmappen-Explorer wird jede zum Projekt gehörige Datei angezeigt. Klappt man die Datei auf, werden alle Klassen in dieser Datei angezeigt. Und wenn man eine Klasse aufklappt, werden alle Elemente der Klasse angezeigt. Auf diese Weise kann man einfach zu den einzelnen Elementen im Quelltext gehen.



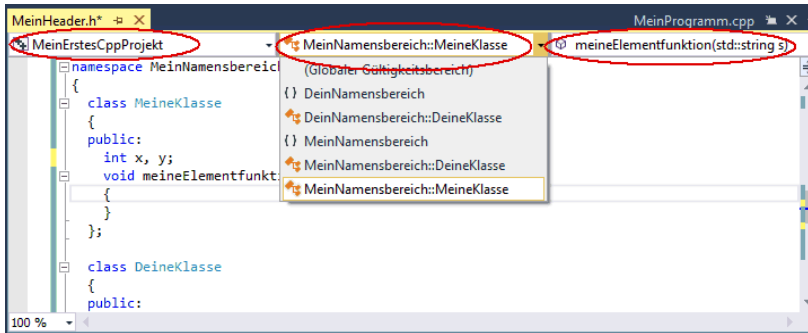
## 1.7 Weiterführende Möglichkeiten Θ

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Möglichkeiten sind für kleinere Projekte wie die Übungen in diesem Buch nicht unbedingt notwendig. Anfänger können diese zunächst übergehen. Für größere Projekte können sie aber sehr nützlich sein.

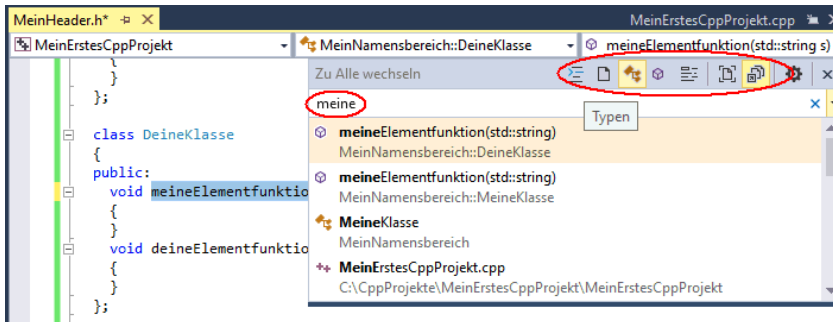


### 1.7.1 Navigieren

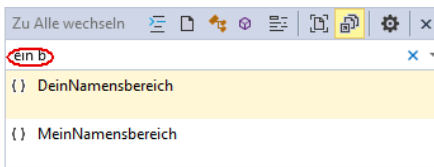
In der **Navigationsleiste** am oberen Rand des Editors wird in der linken Spalte das aktuelle Projekt, in der mittleren die Klasse und in der rechten die Funktion angezeigt, in der sich der Cursor gerade befindet. Nach dem Aufklappen der Pulldown-Menüs werden die Klassen der aktuellen Quelltextdatei bzw. die Funktionen der aktuellen Klasse angezeigt. Wählt man diese aus, wird der Cursor direkt auf die erste Zeile des Elements platziert. Entsprechende Möglichkeiten bestehen auch im Projektmappen-Explorer (siehe Abschnitt 1.6.2).



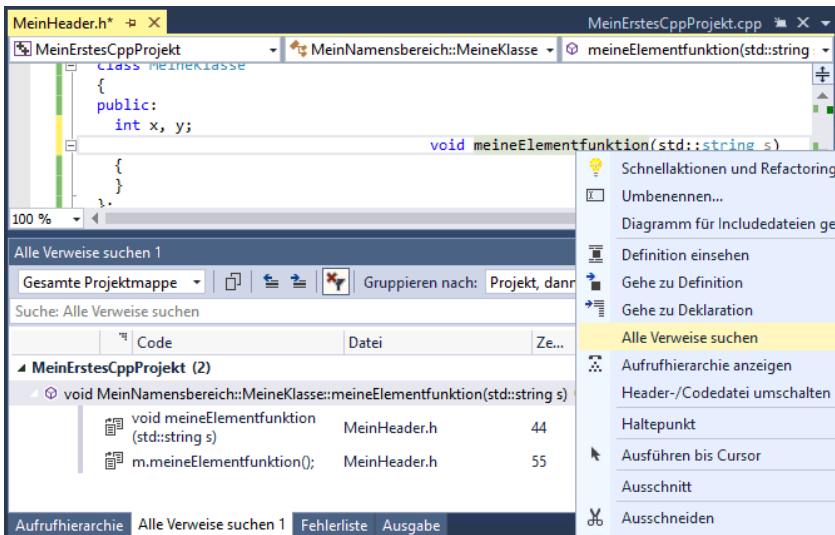
Mit **Bearbeiten|Gehe zu|Gehe zu allen (Strg-T)** kann man einen Namen eingeben. Dann werden alle Datentypen, Namensbereich, Dateien usw. angezeigt, die diesen Namen enthalten. Über die Symbolleiste (bzw. den anderen Optionen von **Bearbeiten|Gehe zu**) können Klassen, Datentypen usw. gefiltert werden:



Werden Strings durch Leerzeichen getrennt, müssen beide enthalten sein.

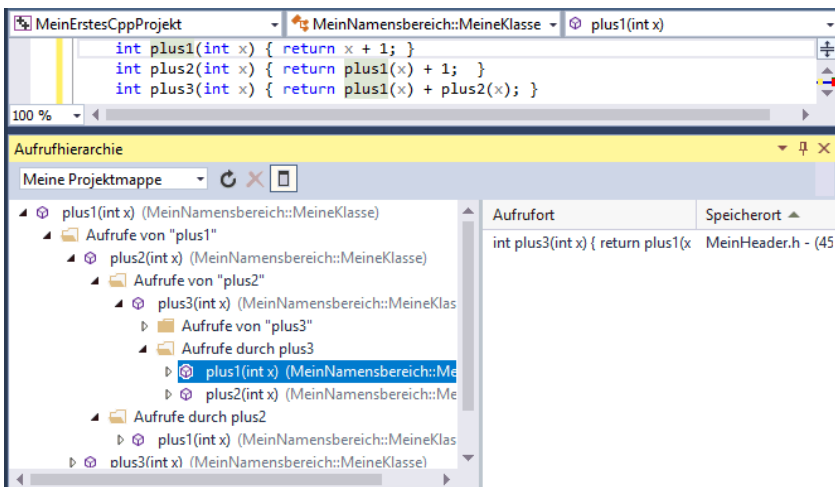


Im Kontextmenü des Editors zum Namen einer Funktion kann man mit **Alle Verweise suchen** alle Stellen in einem Projekt anzeigen, in denen der Name verwendet wird:



Klickt man hier einen Treffer an, wird die entsprechende Stelle im Editor angezeigt. Über das Kontextmenü gibt es weitere Optionen.

Im Kontextmenü des Editors zum Namen einer Funktion kann man alle **Aufrufe** von sowie durch diese Funktion **anzeigen** lassen. Klickt man hier einen Treffer an, wird die Stelle angezeigt, wo sie aufgerufen wird. Klickt man die Funktion im Aufrufort an, wird diese Stelle angezeigt:



### 1.7.2 Code-Ausschnitte

**Code-Ausschnitte** sind Textbausteine für häufig vorkommende Texte. Sie werden im Editor eingefügt, wenn man z.B. „for“ eintippt und dann zweimal die Tab-Taste drückt. So wird der Code-Ausschnitt

```
for (size_t i = 0; i < length; i++)
{
}
```

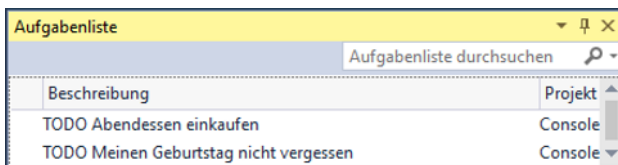
im Editor eingefügt. Mit der Tab-Taste kann man dann zum nächsten Platzhalter in einem Code-Ausschnitt springen. Die verfügbaren Code-Ausschnitte werden mit *Strg+K Strg+X* oder im Kontextmenü des Editors unter *Ausschnitt einfügen* angezeigt. Die von Visual Studio vordefinierten Code-Ausschnitte können durch eigene ergänzt werden. Diese müssen nach einem vorgegebenen Schema in XML geschrieben und mit dem Codeausschnitt-Manager (unter *Tools*) in Visual Studio aufgenommen werden.

### 1.7.3 Aufgabenliste

Eine **Aufgabenliste** kann Merkmaltzettel sparen. Dazu gibt man im Editor einen Kommentar mit dem Schlüsselwort *TODO* und anschließend einen beliebigen Text ein:

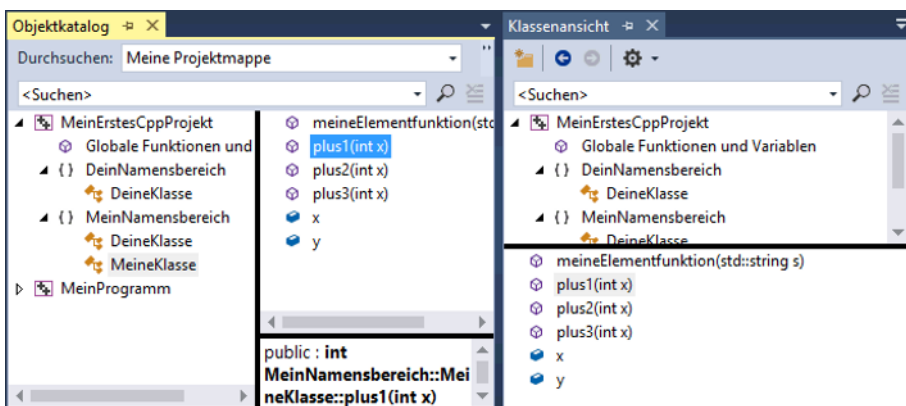
```
// TODO Abendessen einkaufen
// TODO Meinen Geburtstag nicht vergessen
```

Alle solchen Aufgaben werden dann in einer Aufgabenliste (*Ansicht|Aufgabenliste*) angezeigt:



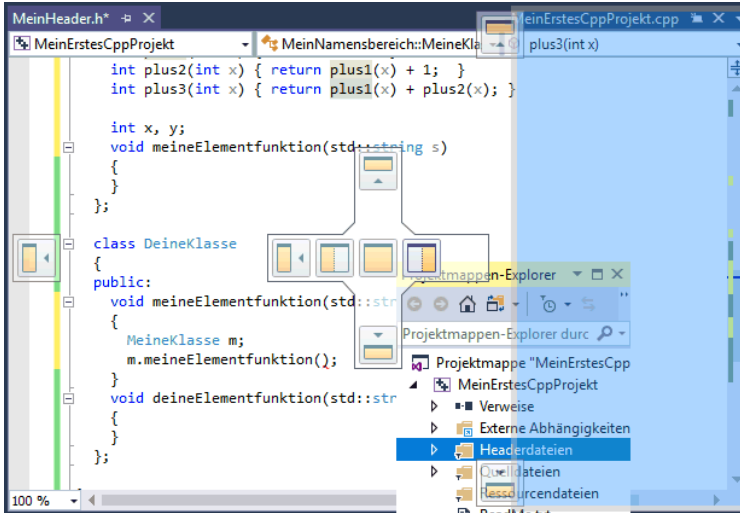
### 1.7.4 Der Objektkatalog und die Klassenansicht Θ

Mit *Ansicht|Objektkatalog* werden alle Klassen und ihre Elemente angezeigt. Durch einen Doppelklick kommt man an die entsprechende Stelle im Quelltext:

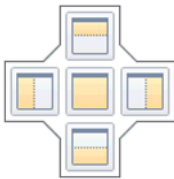


### 1.7.5 Die Fenster von Visual Studio anordnen $\Theta$

Für die Anordnung der Fenster von Visual Studio hat man große Freiheiten. Zieht man ein Fenster (durch Anklicken der Titelzeile) über Visual Studio, wird das sogenannte Diamant-Führungssymbol angezeigt,



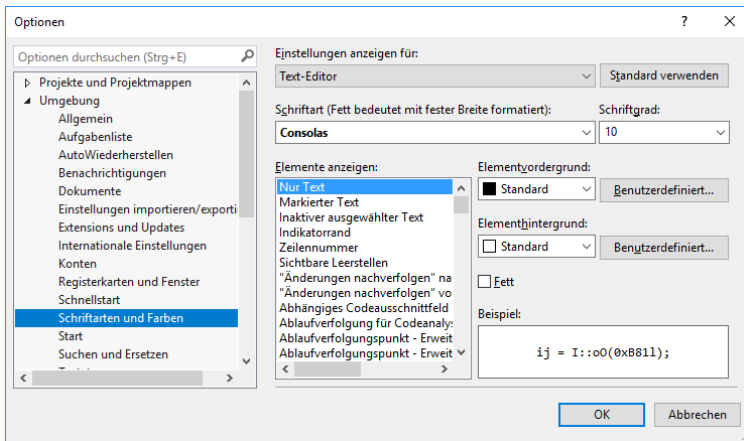
das die verschiedenen Bereiche der IDE skizziert, in denen man ein Fenster andocken kann. Lässt man die Maustaste beim Ziehen des Fensters über einem der Bereiche des Diamant-Führungssymbols los, wird das Fenster im entsprechenden Teil von Visual Studio andockt. Die andockbaren Bereiche können für verschiedene Arten von Fenstern verschieden sein. Für Tool-Fenster wie den Projektmappen-Explorer ist es wie in der letzten Abbildung recht umfangreich. Für Editor-Fenster ist gibt es weniger Bereiche zum Andocken:



Falls Sie sich dabei vertun und nicht die gewünschte Anordnung erhalten, können Sie die letzte Anordnung bei einer gedrückten Strg-Taste durch einen Doppelklick auf die Titelzeile des Fensters wieder erhalten. Den Ausgangszustand bei der Installation von Windows erhält man mit *Fenster|Fensterlayout zurücksetzen*.

### 1.7.6 Einstellungen für den Editor $\Theta$

Unter *Extras|Optionen|Umgebung|Schriftarten und Farben|Einstellungen anzeigen für: Text-Editor* kann man zahlreiche Einstellungen für den Editor individuell anpassen:



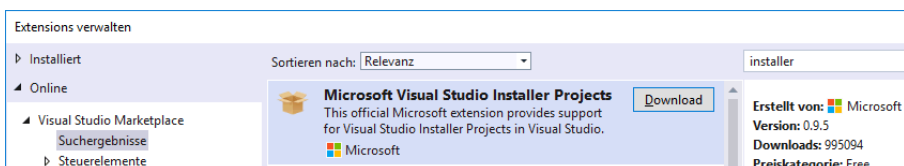
Unter *Extras*|*Optionen*|*Umgebung*|*Tastatur* kann man die Tastenkombinationen für alle Editor-Befehle anpassen. Falls Sie sich z.B. nicht merken können, dass *Strg+'* (links von der Backspace-Taste) das Tastenkürzel ist, mit dem man zur passenden Klammer springen kann, können Sie dafür (der Editor-Befehl *Bearbeiten.GehezuKlammer*) ein intuitiveres Tastenkürzel wählen wie z.B. *Strg+<*.

## 1.8 Bereitstellung (Deployment) Θ

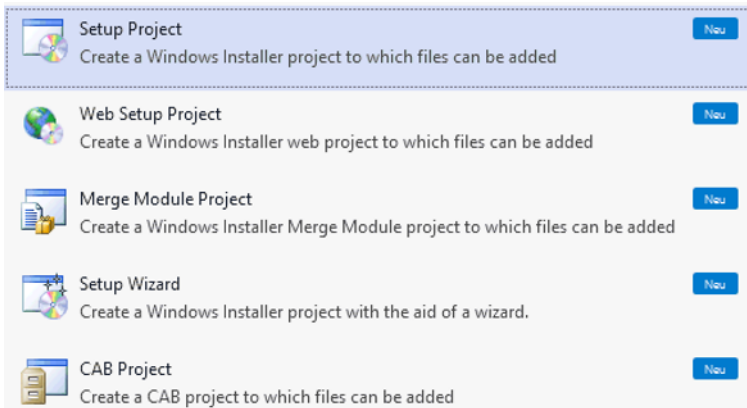
Die Verteilung, Installation und Konfiguration von Software auf den Rechner eines Anwenders wird auch als Software-Verteilung (neudeutsch: Deployment) bezeichnet. Dabei geht es vor allem darum, dass bei größeren Programmen, die nicht nur eine exe-Datei benötigen, sondern auch noch DLLs und weiteren Dateien, nichts vergessen wird. Für die einfachen Übungsaufgaben in diesem Buch ist das aber nicht von Bedeutung.

Die in früheren Versionen von Visual Studio noch verfügbare InstallShield ist für Visual Studio 2019 Community nicht mehr und Visual Studio Professional nur noch kostenpflichtig verfügbar.

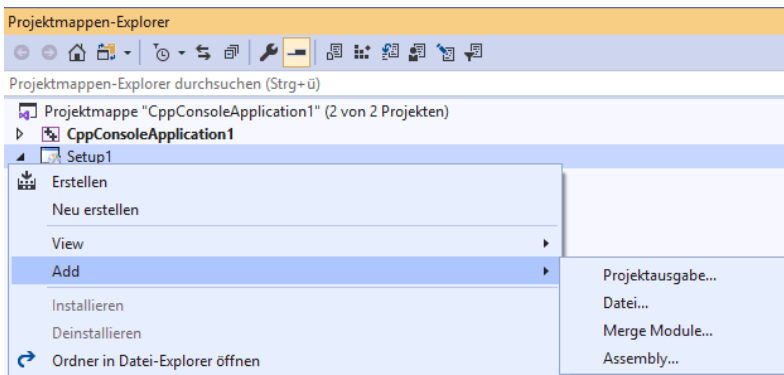
Unter *Erweiterungen*|*Erweiterungen verwalten* kann man die Extension **Microsoft Visual Studio Installer Projects** installieren:



Mit dieser Erweiterung kann man z.B. Setup-Projekte und Microsoft Installerdateien (.msi) erstellen. Nach der Installation dieser Erweiterung werden von Visual Studio Setup-Projekte angeboten. Im Projektmappen-Explorer kann man der Projektmappe mit *Hinzufügen*|*Neues Projekt* ein Setup-Projekt hinzufügen:



Am besten fügt man ein Setup Projekt der Projektmappe des Projekts hinzu. Dann kann man über die Option *Add* im Kontextmenü des Projektmappen-Explorers



alle notwendigen Dateien in die Setup-Datei aufnehmen. Über zahlreiche weitere Optionen kann man die Oberfläche gestalten, Verzeichnisse festlegen usw.

## 2 Elementare Datentypen und Anweisungen

Nachdem im letzten Kapitel gezeigt wurde, wie man mit der Entwicklungsumgebung Visual Studio arbeitet, beginnen wir jetzt mit der Vorstellung der Sprachelemente von C++.

Zunächst werden die Syntaxregeln dargestellt, mit denen die Sprachelemente im C++-Standard beschrieben werden. Darauf folgen elementare Konzepte wie Variablen, fundamentale Datentypen, Anweisungen, Zeiger, Konstanten usw. Programmieren ist allerdings mehr, als nur Anweisungen zu schreiben, die der Compiler ohne Fehlermeldung akzeptiert. Deswegen werden zusammen mit den Sprachelementen auch systematische Tests und Techniken zur Programmverifikation vorgestellt und mit Aufgaben geübt.

Die meisten dieser Konzepte und Datentypen findet man auch schon in der Programmiersprache C. Deshalb ist dieses Kapitel auch eine umfassende und detaillierte Einführung in C. Da aber nicht jeder Programmierer alle diese Details benötigt, sind zahlreiche Abschnitte (vor allem gegen Ende des Kapitels) in der Überschrift mit dem Zeichen  $\Theta$  gekennzeichnet. Diese Abschnitte können bei einem ersten Einstieg ausgelassen werden.

Die meisten Themen werden durch **Übungsaufgaben** ergänzt. Alle Programmieraufgaben können mit einer Konsolenanwendung gelöst werden, die wie in Abschnitt 1.2.4 aufgebaut ist.

### 2.1 Syntaxregeln

Im C++-Standard wird die Syntax der Sprachelemente durch Syntaxregeln beschrieben. Diese Syntaxregeln zeigen oft klarer als verbale Beschreibungen, wie die Sprachelemente verwendet werden müssen, und werden deshalb auch in diesem Buch verwendet. Da die Syntaxregeln im C++-Standard oft ziemlich komplex sind, werden hier meist nur Ausschnitte dargestellt, die das Wesentliche zeigen.

In diesem Abschnitt wird an einigen Beispielen gezeigt, wie Syntaxregeln aufgebaut sind und wie man sie lesen kann.

Ein Sprachelement wird oft durch weitere Sprachelemente definiert, die dann nach einem Doppelpunkt in den folgenden Zeilen angegeben werden. Für das zu definierende Sprachelement können dann alle Zeichenfolgen eingesetzt werden, die für die definierenden Sprachelemente zulässig sind.

## Die Syntaxregel

*translation-unit:*

*declaration-seq* <sub>opt</sub>

definiert eine Übersetzungseinheit („translation-unit“) als eine Folge von Deklarationen („declaration-seq“). Wegen „opt“ kann diese Folge auch leer sein.

Werden nach dem zu definierenden Begriff mehrere Zeilen angegeben, sind sie als Alternative zu verstehen. Für das zu definierende Sprachelement können dann alle Zeichenfolgen eingesetzt werden, die für die Sprachelemente der einzelnen Zeilen zulässig sind.

*declaration-seq:*

*declaration*

*declaration-seq declaration*

Aus der mittleren dieser drei Zeilen folgt deshalb, dass eine „declaration-seq“ eine „declaration“ sein kann. Wenn in einer dieser Zeilen der zu definierende Begriff verwendet wird, kann man für ihn eine Definition einsetzen, die sich aus dieser Syntaxregel ergibt. Verwendet man hier in der letzten Zeile, dass eine „declaration-seq“ eine „declaration“ sein kann, erhält man eine „declaration-seq“ aus zwei Deklarationen. Diese Schritte kann man beliebig oft wiederholen (Rekursion). Deshalb besteht eine „declaration-seq“ aus einer oder mehreren Deklarationen.

Ein Deklaration ist eine Blockdeklaration oder eine Funktionsdefinition usw:

*declaration:*

*block-declaration*

*function-definition*

*template-declaration*

*namespace-definition*

...

Vorläufig werden wir nur Blockdeklarationen verwenden, die eine „einfache Deklaration“ sind:

*block-declaration:*

*simple-declaration*

*using-declaration*

*using-directive*

...

*simple-declaration:*

*decl-specifier-seq* <sub>opt</sub> *init-declarator-list* <sub>opt</sub> ;

Offensichtlich können die Syntaxregeln recht verschachtelt sein. Will man herausfinden, wie man ein Sprachelement einsetzen kann, erfordert das oft eine ganze Reihe von Zwischenschritten. Die Suche ist erst dann beendet, wenn man ein sogenanntes **terminales Symbol** gefunden hat. Terminale Symbole sind in den Syntaxregeln in



Schreibmaschinenschrift gedruckt und müssen im Programm genauso wie in der Syntaxregel verwendet werden.

Über einige weitere Zwischenschritte ergibt sich, dass eine *decl-specifier-seq* ein *simple-type-specifier* sein kann:

```
simple-type-specifier:
    : :opt nested-name-specifier opt type-name
    char
    char16_t
    char32_t
    wchar_t
    bool
    short
    int
    long
    signed
    unsigned
    float
    double
    void
    auto
```

Deshalb kann eine Deklaration z.B. mit einem der Typnamen *int*, *short*, *char* usw. beginnen. Nach einigen Zwischenschritten kann man ebenso feststellen, dass eine „init-declarator-list“ aus einem oder mehreren **Bezeichnern (identifier)** bestehen kann, die durch Kommas getrennt werden. Diese Syntaxregel gilt in C++ für alle Namen, die ein Programmierer für Variablen, Funktionen, Datentypen usw. wählt.

```
identifier:
    nondigit
    identifier nondigit
    identifier digit

nondigit: one of
    universal-character-name
    _ a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z
    A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z

digit: one of
    0 1 2 3 4 5 6 7 8 9
```

Hier bedeutet „one of“, dass die folgenden Symbole alternativ verwendet werden können. Die Konstruktion mit „one of“ entspricht einer langen Liste von Alternativen, die aus Platzgründen in eine Zeile geschrieben wurden.

Ein Bezeichner muss deshalb mit einem Buchstaben des ASCII-Zeichensatzes, dem Unterstrichzeichen „\_“ oder einem *universal-character-name* (dazu gehören auch länderspezifische Buchstaben wie Umlaute, Buchstaben mit Akzent-Zeichen, arabische und asiatische Buchstaben usw.) beginnen und kann von weiteren solchen Zeichen sowie den Ziffern 0..9 gefolgt werden.

Allerdings informieren die Syntaxregeln nur über die notwendigen Voraussetzungen dafür, dass der Compiler ein Programm übersetzen kann. Oft gibt es weitere Regeln, die nicht in den Syntaxregeln enthalten sind. Für Bezeichner sind das beispielsweise:

- Nach dem C++ Standard sollen Bezeichner **1024 Zeichen** lang sein können. Visual C++ berücksichtigt „nur“ die ersten 2048 Zeichen. Namen, die sich erst ab dem 2049-ten Zeichen unterscheiden, werden als identisch betrachtet.
- Innerhalb eines Blocks (siehe Abschnitt 2.4.1) müssen die Namen eindeutig sein.
- Groß- und Kleinbuchstaben werden in Bezeichnern unterschieden. Die beiden Bezeichner *summe* und *Summe* sind also nicht identisch.
- Bezeichner sollten nicht mit einem „\_“ beginnen. Solche Namen sind üblicherweise für Bibliotheken reserviert und können zu Namenskonflikten führen.
- Ein **Schlüsselwort** (das ist ein Wort, das für den Compiler eine feste Bedeutung hat) darf nicht als Bezeichner verwendet werden. Im C++-Standard für C++20 sind die folgenden Schlüsselworte definiert:

|           |              |                  |              |
|-----------|--------------|------------------|--------------|
| alignas   | co_return    | long             | switch       |
| alignof   | co_yield     | mutable          | template     |
| asm       | decltype     | namespace        | this         |
| auto      | default      | new              | thread_local |
| bool      | delete       | noexcept         | throw        |
| break     | do           | nullptr          | true         |
| case      | double       | operator         | try          |
| catch     | dynamic_cast | private          | typedef      |
| char      | else         | protected        | typeid       |
| char8_t   | enum         | public           | typename     |
| char16_t  | explicit     | register         | union        |
| char32_t  | export       | reinterpret_cast | unsigned     |
| class     | extern       | requires         | using        |
| concept   | false        | return           | virtual      |
| const     | float        | short            | void         |
| constexpr | for          | signed           | volatile     |
| constexpr | friend       | sizeof           | wchar_t      |
| constexpr | goto         | static           | while        |
| constexpr | if           | static_assert    |              |
| continue  | inline       | static_cast      |              |
| co_await  | int          | struct           |              |

## Aufgabe 2.1

Geben Sie drei Beispiele für Ziffernfolgen an, die nach den Syntaxregeln für ein *decimal-literal* gebildet werden können, sowie drei Beispiele, die diese Regeln nicht einhalten. Formulieren Sie diese Syntaxregel außerdem verbal.

*decimal-literal:*  
    *nonzero-digit*  
    *decimal-literal digit*

*nonzero-digit:* one of  
    1 2 3 4 5 6 7 8 9

*digit:* one of  
    0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

## 2.2 Variablen und Bezeichner

Wie in jeder anderen Programmiersprache kann man auch in C++ Speicherplätze im **Hauptspeicher** zur Speicherung von Daten verwenden. Dieser Hauptspeicher wird auch als **RAM** (Random Access Memory) bezeichnet. Die meisten PCs besitzen heute 4096 MB (Megabytes) oder mehr Hauptspeicher, wobei 1 MB ca. 1 Million (genau:  $2^{20}=1048576$ ) Speicherzellen (Bytes) sind. Ein Byte ist die grundlegende Speichereinheit und umfasst 8 Bits, die zwei Werte (0 und 1) annehmen können. Deshalb kann ein Byte 256 ( $=2^8$ ) verschiedene Werte darstellen. Die Bytes sind der Reihe nach durchnummeriert, und diese Nummer eines Bytes wird auch als seine **Adresse** bezeichnet.

Damit sich der Programmierer nun nicht für alle seine Daten die Adressen der jeweiligen Speicherplätze merken muss, bieten höhere Programmiersprachen die Möglichkeit, Speicherplätze unter einem Namen anzusprechen. Ein solcher Name für Speicherplätze wird als **Variable** bezeichnet, da sich die in diesen Speicherplätzen dargestellten Daten während der Laufzeit eines Programms ändern können. Die durch eine Variable dargestellten Daten werden als **Wert** der Variablen bezeichnet. Zu einer Variablen gehört außer ihrem Namen und Wert auch noch ihre **Adresse** und ihr **Datentyp**: Der Datentyp legt fest, wie viele Bytes die Variable ab ihrer Adresse im Hauptspeicher belegt, und wie das Bitmuster dieser Bytes interpretiert wird.

Für jede in einem Programm verwendete Variable werden dann während der Kompilation des Programms die Adressen der Speicherplätze durch den Compiler berechnet. Der Programmierer braucht sich also nicht um diese Adressen zu kümmern, sondern kann sie unter dem Namen ansprechen, den er für die Variable gewählt hat.

Alle Variablen eines C++-Programms müssen vor ihrer Verwendung definiert werden. Eine solche **Definition** enthält den **Namen der Variablen**, ihren **Datentyp** und eventuell noch weitere Angaben. Durch den Datentyp wird festgelegt,

- wie viel **Speicherplatz** der Compiler für die Variable reservieren muss,
- welche **Werte** sie annehmen kann, und
- welche **Operationen** mit ihr möglich sind.

Eine Definition wird im einfachsten Fall durch die Syntaxregel für eine **einfache Deklaration** beschrieben, die schon im letzten Abschnitt vorgestellt wurde. Solche Deklarationen sind nach dem Schema

```
T var1, var2, ...;
```

aufgebaut. Hier steht T für einen Datentyp, wie z.B. den vordefinierten Datentyp *int*, mit dem man ganzzahlige Werte darstellen kann. Die Namen der Variablen sind hier *var1*, *var2* usw. und müssen Bezeichner (siehe Abschnitt 2.2) sein, die alle verschieden sind.

Beispiel: Durch

```
int a, b, d;
```

werden drei Variablen *a*, *b* und *d* des Datentyps *int* definiert. Diese Definition mit mehreren durch Kommas getrennten Bezeichnern und einem Datentyp wie *int* ist gleichwertig mit einer Reihe von Variablendefinitionen, bei denen jeweils nur eine Variable definiert wird:

```
int a;
int b;
int d;
```

Variablen können **global** oder **lokal** definiert werden. Eine globale Variable erhält man durch eine Definition, die außerhalb einer Funktion oder Klasse erfolgt. Sie kann dann ab ihrer Definition in jeder Funktion verwendet werden, die keine lokale Variable mit demselben Namen definiert:

Beispiel: Die Variable *i* ist außerhalb einer Klasse und Funktion definiert und deshalb eine globale Variable:

```
int i; // Definition der globalen Variablen i

int main()
{
  ...
}
```

Diese Variable kann dann in jeder anschließend definierten Funktion verwendet werden:

```
void meineFunktion() // Eine Funktion.
{ // Funktionen sind wichtige Programmbausteine und werden
  i = 0; // in Abschnitt 2.4.3 vorgestellt.
}
```

```

void deineFunktion()
{
    i++;
    cout << i << endl;
}

int main()
{
    meineFunktion(); // i=0
    deineFunktion(); // i=1
    deineFunktion(); // i=2
}

```

Beim Aufruf von *meineFunktion* wird der Variablen *i* der Wert 0 zugewiesen. Der Wert von *i* wird bei jedem Aufruf von *deineFunktion* um 1 erhöht und angezeigt.

Da Programme mit globalen Variablen leicht unübersichtlich werden, sollte man globale Variable vermeiden. Das ist allerdings ohne die Sprachelemente der objektorientierten Programmierung (siehe Kapitel 8) nicht immer möglich. Deshalb werden sie bis zu diesem Kapitel trotzdem gelegentlich verwendet.

Definiert man eine Variable dagegen innerhalb einer Funktion, erhält man eine **lokale Variable**. Eine solche Variable kann nur in dieser Funktion verwendet werden. Falls man in verschiedenen Funktionen lokale Variablen mit demselben Namen definiert, sind das verschiedene Variablen.

```

void meineFunktion()
{
    int k;
}

void deineFunktion()
{
    k = 2; // error: 'k' : nichtdeklarerter Bezeichner
}

```

Eine lokale Variable kann denselben Namen haben wie eine globale. Das sind dann verschiedene Variablen.

Variablen können bei ihrer Definition initialisiert werden. Dazu gibt man nach dem Namen der Variablen ein Gleichheitszeichen und den Wert an, den sie bei der Definition erhalten soll:

```
int a = 17, b = 18, d = 19;
```

Ohne eine explizite Initialisierung werden alle globalen Variablen eines fundamentalen Datentyps (wie z.B. *int*) beim Start des Programms mit dem Wert 0 initialisiert. Lokale Variablen werden dagegen nicht initialisiert: Ihr Wert ergibt sich aus dem Bitmuster, das bei der Reservierung des Speicherplatzes zufällig an den entsprechenden Speicherzellen steht. Den Wert einer solchen lokalen Variablen bezeichnet man auch als **unbestimmt**.

```

int i;    // global, wird mit 0 initialisiert

void meineFunktion()
{
    int j; // lokal, der Wert von j ist unbestimmt.
    int k = 0;
    cout << i + j + k << endl; // error: nicht initialisierte
                                Variablen i und j
};

```

Variable, bei denen die Initialisierung vergessen wurde und die deshalb einen undefinierten Wert haben, können die Ursache von diffizilen Fehlern sein. Deswegen sollten alle Variablen bei ihrer Definition initialisiert werden.

Beispiel: Bei einer Codeanalyse mit den C++ Core Guidelines (siehe Abschnitt 2.13) wird eine Warnung ausgegeben, wenn eine lokale Variable bei ihrer Definition nicht initialisiert wird. Eine solche Warnung kommt aber auch dann, wenn die Variable anschließend vor ihrer ersten Verwendung einen Wert erhält. Bei einer globalen Variablen kommt keine Warnung:

```

int global; // keine Warnung

int Variable_nicht_initialisiert(bool b)
{ // warning C26494: Die Variable "lokal" ist nicht
  int lokal; //              initialisiert.
  return lokal + global;
}

```

## Aufgabe 2.2

1. Begründen Sie für jede dieser Definitionen, ob sie zulässig ist oder nicht:

```

int Preis_in_$, x kleiner y, Zinssatz_in_%, x / y, this,
   Einwohner_von_Tübingen, äääÄéÊË;

```

2. Welche Werte werden beim Start dieses Programms ausgegeben?

```

int i = 0;
int j;

int main()
{
    int k = 1;
    cout << "i=" << i << endl;
    cout << "j=" << j << endl;
    cout << "k=" << k << endl;
    int i = 3;
    cout << "i=" << i << endl;
};

```

## 2.3 Ganzzahldatentypen

Variablen, deren Datentyp ein Ganzzahldatentyp ist, können ganzzahlige Werte darstellen. Je nach Datentyp können dies ausschließlich positive Werte oder positive und negative Werte sein. Der Bereich der darstellbaren Werte hängt dabei davon ab, wie viele Bytes der Compiler für eine Variable des Datentyps reserviert und wie er diese interpretiert.

In C++ gibt es die folgenden Ganzzahldatentypen:

| Datentyp                                                                                                                                         | Wertebereich in Visual C++ (32 und 64 bit)    | Datenformat            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------|
| <b><i>signed char</i></b><br><b><i>char</i></b> (Voreinstellung)                                                                                 | −128 .. 127                                   | 8 bit mit Vorzeichen   |
| <b><i>unsigned char</i></b>                                                                                                                      | 0 .. 255                                      | 8 bit ohne Vorzeichen  |
| <b><i>short int</i></b><br><i>short</i><br><i>signed short</i><br><i>signed short int</i>                                                        | −32768 .. 32767                               | 16 bit mit Vorzeichen  |
| <b><i>unsigned short int</i></b><br><i>unsigned short</i><br><b><i>wchar_t</i></b>                                                               | 0 .. 65535                                    | 16 bit ohne Vorzeichen |
| <b><i>int</i></b><br><i>signed</i><br><i>signed int</i><br><b><i>long int</i></b><br><i>long</i><br><i>signed long</i><br><i>signed long int</i> | −2,147,483,648..<br>2,147,483,647             | 32 bit mit Vorzeichen  |
| <b><i>unsigned int</i></b><br><i>unsigned</i><br><b><i>unsigned long int</i></b><br><i>unsigned long</i>                                         | 0 .. 4,294,967,295                            | 32 bit ohne Vorzeichen |
| <b><i>long long</i></b>                                                                                                                          | −9223372036854775808<br>..9223372036854775807 | 64 bit mit Vorzeichen  |
| <b><i>unsigned long long</i></b>                                                                                                                 | 0 ..18446744073709551615                      | 64 bit ohne Vorzeichen |
| <b><i>bool</i></b>                                                                                                                               | <i>true, false</i>                            |                        |
| <b><i>char16_t</i></b>                                                                                                                           | Unicode-Zeichen                               | 16 bit                 |
| <b><i>char32_t</i></b>                                                                                                                           | Unicode-Zeichen                               | 32 bit                 |

Wie diese Tabelle zeigt, gibt es für die meisten Datenformate verschiedene Namen. Ein fett gedruckter Name steht dabei für denselben Datentyp wie die darauffolgenden nicht fett gedruckten Namen. So sind z.B. *char*, *signed char* und *unsigned char* drei verschiedene Datentypen. Dagegen sind *signed* und *signed int* alternative Namen für den Datentyp *int*. Dass diese Namen unterschiedliche Datentypen sind, ist aber außer in Zusammenhang mit überladenen Funktionen kaum von Bedeutung. Die *long long* Datentypen sind mindestens 64 bit breit.

Der C++-Standard legt explizit nicht fest, welchen **Wertebereich** ein bestimmter Ganzzahldatentyp darstellen können muss. Es wird lediglich verlangt, dass der Wertebereich eines Datentyps, der in der Liste

*signed char, signed short, int, long int*

rechts von einem anderen steht, nicht kleiner ist als der eines Datentyps links davon. Deswegen können verschiedene Compiler verschiedene Formate für den Datentyp *int* verwenden: Bei Compilern für 16-bit-Systeme werden häufig 16 Bits für den Datentyp *int* verwendet und bei Compilern für 32-bit-Systeme 32 Bits. Für 64-Bit Systeme könnte man 64 Bits erwarten, tatsächlich verwenden viele Compiler aber 32 Bits.

Die Datentypen *signed char, short int, int, long int* usw. werden unter dem Oberbegriff **Ganzzahldatentyp mit Vorzeichen** zusammengefasst. Ein **Ganzzahldatentyp ohne Vorzeichen** ist einer der Datentypen *unsigned char, unsigned short int, unsigned int, unsigned long* usw. Die Ganzzahldatentypen mit und ohne Vorzeichen sind zusammen mit den Datentypen *bool, char* und *wchar\_t* die **Ganzzahldatentypen**.

Die potentiellen Unsicherheiten über die Breite eines Ganzzahldatentyps können mit den seit C++11 nach

```
#include <cstdint>
```

verfügbaren Ganzzahldatentypen fester Breite vermieden werden:

*int8\_t, int16\_t, int32\_t, int64\_t*: 8-, 16-, 32- oder 64-Bit mit Vorzeichen  
*uint8\_t, uint16\_t, uint32\_t, uint64\_t*: 8-, 16-, 32- oder 64-Bit ohne Vorzeichen

Diese Namen sind aber keine eigenständigen Datentypen, sondern nur andere Namen für *char, int* usw. Namen für die maximalen Ganzzahldatentypen sind:

*intmax\_t* und *uintmax\_t*

Der Standard für die Programmiersprache C verlangt, dass die Wertebereiche in einer Datei dokumentiert werden, die man mit „`#include <limits.h>`“ erhält“. Da der C-Standard auch weitgehend in den C++-Standard übernommen wurde, gilt das auch für C++. Bei dem folgenden Auszug aus „`include\limits.h`“ wurde das Layout etwas überarbeitet:

```
#define CHAR_BIT      8 // number of bits in a char
#define SCHAR_MIN    (-128) // minimum signed char value
#define SCHAR_MAX     127  // maximum signed char value
#define UCHAR_MAX    255   // maximum unsigned char value
#define SHRT_MIN     (-32767-1) // minimum signed short value
#define SHRT_MAX     32767    // maximum signed short value
#define USHRT_MAX    65535U  // maximum unsigned short value
#define LONG_MIN     (-2147483647L-1) // minimum signed long ..
#define LONG_MAX     2147483647L  // maximum signed long value
#define ULONG_MAX    4294967295UL // maximum unsigned long ..
#define INT_MIN      LONG_MIN  // minimum signed int value
#define INT_MAX      LONG_MAX  // maximum signed int value
```



Beispiel: Die Konstanten aus dieser Datei können nach

```
#include <limits.h>
```

verwendet werden:

```
cout << "Min=" << INT_MIN << " Max=" << INT_MAX << endl;
```

In C++ sind diese und weitere Grenzen außerdem im Klassen-Template *numeric\_limits* definiert. Es steht zur Verfügung nach

```
#include <limits>
```

Auch wenn bisher noch nichts über Klassen und Templates gesagt wurde, soll mit den folgenden Beispielen gezeigt werden, wie man auf die Informationen in diesen Klassen zugreifen kann:

```
int i1 = std::numeric_limits<int>::min(); //-2147483648
int i2 = std::numeric_limits<int>::max(); // 2147483647
```

Natürlich erhält man hier keine anderen Werte als mit den Konstanten aus „limits.h“. Und die etwas längeren Namen wirken zusammen mit der für Anfänger vermutlich ungewohnten Syntax auf den ersten Blick vielleicht etwas abschreckend. Allerdings sind hier alle Namen nach einem durchgängigen Schema aufgebaut, im Unterschied zu den teilweise etwas kryptischen Abkürzungen in „limits.h“. Die minimalen und maximalen Werte für den Datentyp *char* erhält man, indem man im letzten Beispiel einfach nur *int* durch *char* ersetzt:

```
int c1 = std::numeric_limits<char>::min(); //-128
int c2 = std::numeric_limits<char>::max(); // 127
```

### 2.3.1 Die interne Darstellung von Ganzzahlwerten

Die meisten Prozessoren verwenden für die interne Darstellung von Werten eines **Ganzzahldatentyps ohne Vorzeichen** das Binärsystem. Dabei entspricht jedem Wert im Wertebereich ein eindeutiges Bitmuster.

Beispiel: Das Bitmuster für Werte des Datentyps *unsigned char* (8 Bits):

| Zahl $z_{10}$ | Binärdarstellung mit 8 Bits |
|---------------|-----------------------------|
| 0             | 0000 0000                   |
| 1             | 0000 0001                   |
| 2             | 0000 0010                   |
| 3             | 0000 0011                   |
| ...           | ...                         |
| 254           | 1111 1110                   |
| 255           | 1111 1111                   |

Zwischen den einzelnen Bits  $b_7b_6b_5b_4b_3b_2b_1b_0$  und der durch sie im Dezimalsystem dargestellten Zahl  $z_{10}$  besteht dabei die folgende Beziehung:

$$z_{10} = b_7 \cdot 2^7 + b_6 \cdot 2^6 + b_5 \cdot 2^5 + b_4 \cdot 2^4 + b_3 \cdot 2^3 + b_2 \cdot 2^2 + b_1 \cdot 2^1 + b_0 \cdot 2^0$$

Beispiel:  $25_{10} = 0 \cdot 2^7 + 0 \cdot 2^6 + 0 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0$   
 $= 00011001_2$

Hier ist die jeweilige Basis durch einen tiefer gestellten Index dargestellt:  $25_{10}$  ist eine Zahl im Dezimalsystem,  $00011001_2$  eine im Binärsystem.

Bei der Darstellung einer Zahl  $z$  durch Ziffern  $..z_3z_2z_1z_0$  im **Dezimalsystem** wird ebenfalls ein Stellenwertsystem verwendet, nur mit dem Unterschied, dass als Basis die Zahl 10 und nicht die Zahl 2 verwendet wird. Als Ziffern stehen die Zahlen 0 .. 9 zur Verfügung:

$$z = \dots z_3 \cdot 10^3 + z_2 \cdot 10^2 + z_1 \cdot 10^1 + z_0 \cdot 10^0 \text{ // } z_i: 0 \dots 9$$

Beispiel:  $25_{10} = 2 \cdot 10^1 + 5 \cdot 10^0$

Offensichtlich kann eine ganze Zahl in einem beliebigen **Zahlensystem zur Basis B** mit B Ziffern 0 .. B-1 dargestellt werden:

$$z = \dots z_3 \cdot B^3 + z_2 \cdot B^2 + z_1 \cdot B^1 + z_0 \cdot B^0 \text{ // } z_i: 0 \dots B-1$$

Beispiel:  $17_{10} = 1 \cdot 3^2 + 2 \cdot 3^1 + 2 \cdot 3^0 = 122_3$   
 $17_{10} = 2 \cdot 7^1 + 3 \cdot 7^0 = 23_7$

Zur übersichtlicheren Darstellung von Binärzahlen wird oft das **Hexadezimalsystem** (zur Basis 16) verwendet. Die 16 Ziffern im Hexadezimalsystem werden mit 0, 1, ..., 9, A, B, C, D, E, F bezeichnet:

| dezimal | dual | hexadezimal | dezimal | dual | hexadezimal |
|---------|------|-------------|---------|------|-------------|
| 0       | 0000 | 0           | 8       | 1000 | 8           |
| 1       | 0001 | 1           | 9       | 1001 | 9           |
| 2       | 0010 | 2           | 10      | 1010 | A           |
| 3       | 0011 | 3           | 11      | 1011 | B           |
| 4       | 0100 | 4           | 12      | 1100 | C           |
| 5       | 0101 | 5           | 13      | 1101 | D           |
| 6       | 0110 | 6           | 14      | 1110 | E           |
| 7       | 0111 | 7           | 15      | 1111 | F           |

Im Hexadezimalsystem können die 8 Bits eines Bytes zu 2 hexadezimalen Ziffern zusammengefasst werden, indem man die vordere und hintere Gruppe von 4 Bits einzeln als Hexadezimalziffer darstellt:

Beispiel:  $25_{10} = 0001\ 1001_2 = 19_{16}$

In C++ wird ein hexadezimaler Wert dadurch gekennzeichnet, dass man vor den hexadezimalen Ziffern die Zeichenfolge „0x“ angibt:

```
int i = 0x19; // gleichwertig mit i=25;
```

Bei **Datentypen mit Vorzeichen** werden mit  $n$  Bits die positiven Zahlen von  $0 \dots 2^{n-1}-1$  ebenfalls im Binärsystem dargestellt. Für negative Zahlen wird dagegen das sogenannte **Zweierkomplement** verwendet. Das Zweierkomplement beruht darauf, dass man zu einer Zahl, die im Speicher mit  $n$  Bits dargestellt wird, die Zahl  $10\dots0_2$  aus  $n$  Nullen und einer führenden 1 addieren kann, ohne dass sich diese Addition auf das Ergebnis auswirkt, da die 1 wegen der begrenzten Bitbreite ignoriert wird. Stellt man so die negative Zahl

- 00011001<sub>2</sub>

durch

(100000000<sub>2</sub> - 00011001<sub>2</sub>)

dar, wird die Addition der negativen Zahl (Subtraktion) auf eine Addition des Zweierkomplements zurückgeführt. Das Zweierkomplement erhält man direkt durch die Subtraktion:

```
1000000002
-000110012
111001112
```

Einfacher erhält man es aus der Binärdarstellung, indem man jede 1 durch eine 0 und jede 0 durch eine 1 ersetzt (Einerkomplement) und zum Ergebnis 1 addiert.

Beispiel:

|                   |   |                       |
|-------------------|---|-----------------------|
| 25 <sub>10</sub>  | = | 00011001 <sub>2</sub> |
| Einerkomplement:  |   | 11100110              |
| + 1.....          |   | 1                     |
| Zweierkomplement: |   | 11100111              |

Damit hat die Zahl -25 die Darstellung 11100111

Im Zweierkomplement zeigt also eine 1 im höchstwertigen Bit an, dass die Zahl negativ ist. Insbesondere wird die Zahl -1 im Zweierkomplement immer durch so viele Einsen dargestellt, wie Bits für die Darstellung der Zahl vorgesehen sind:

-1 mit 8 Bits: 1111 1111  
 -1 mit 16 Bits: 1111 1111 1111 1111  
 -1 mit 32 Bits: 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111

Berechnet man von einer negativen Zahl, die im Zweierkomplement dargestellt ist, wieder das Zweierkomplement, erhält man die entsprechende positive Zahl.

Beispiel: 1. -25<sub>10</sub> = 11100111<sub>2</sub>

|                   |          |
|-------------------|----------|
| Einerkomplement:  | 00011000 |
| + 1               | 1        |
| Zweierkomplement: | 00011001 |

Das ist gerade die Zahl 25 im Binärsystem.

2. Dem maximalen negativen Wert  $100 \dots 00_2$  entspricht kein positiver Wert. Das Zweierkomplement ist wieder derselbe Wert.

Wegen dieser verschiedenen Darstellungsformate kann dasselbe Bitmuster zwei verschiedene Werte darstellen – je nachdem, welches Datenformat verwendet wird. Zum Beispiel stellt das Bitmuster 11100111 für einen 8-bit-Datentyp ohne Vorzeichen den Wert 231 dar, während es für einen 8-bit-Datentyp mit Vorzeichen den Wert –25 darstellt.

### 2.3.2 Ganzzahliliterale und ihr Datentyp

Eine Zeichenfolge, die einen Wert darstellt, bezeichnet man als **Konstante** oder als **Literal**. Beispielsweise ist die Zahl „20“ in

```
i = 20;
```

ein solches Literal. Seit C++14 kann ein Ganzzahliliteral auch Hochkommas als **Trennzeichen** enthalten. Diese werden vor allem verwendet, um Gruppen von Ziffern optisch zu gliedern.

Beispiel: Trennzeichen werden z.B. für Tausendergruppen verwendet:

```
int x = 1'000'000;
```

Der Compiler akzeptiert aber Trennzeichen an beliebigen Positionen:

```
int y = 1'0'00'00'0;
```

In C++ gibt es die folgenden Ganzzahliliterale:

```
integer-literal:
  decimal-literal integer-suffixopt
  octal-literal integer-suffixopt
  hexadecimal-literal integer-suffixopt
  binary-literal integer-suffixopt
```

Die ersten Zeichen (von links) eines Literals entscheiden darüber, um welche Art von Literal es sich handelt:

- Eine Folge von Dezimalziffern, die mit einer von Null verschiedenen Ziffer beginnt, ist ein Dezimalliteral (zur Basis 10):

```
decimal-literal:
  nonzero-digit
  decimal-literal' opt digit
```

```
nonzero-digit: one of
  1 2 3 4 5 6 7 8 9
```

```
digit: one of
  0 1 2 3 4 5 6 7 8 9
```

- Eine Folge von Oktalziffern, die mit 0 (Null, nicht der Buchstabe „O“) beginnt, ist ein Oktalliteral (Basis 8).

*octal-literal:*  
 0  
*octal-literal* ' <sub>opt</sub> *octal-digit*

*octal-digit:* one of  
 0 1 2 3 4 5 6 7

- Ein Folge von Hexadezimalziffern, die mit der Zeichenfolge „0x“ oder „0X“ (Null, nicht dem Buchstaben „O“) beginnt, ist ein hexadezimal Literal:

*hexadecimal-literal:*  
 0x *hexadecimal-digit*  
 0X *hexadecimal-digit*  
*hexadecimal-literal* ' <sub>opt</sub> *hexadecimal-digit*

*hexadecimal-digit:* one of  
 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9  
 a b c d e f  
 A B C D E F

- Seit C++14 können auch binäre Literale verwendet werden: Das ist eine Folge der Ziffern 0 oder 1, die auf „0b“ oder „0B“ (Null, nicht dem Buchstaben „O“) folgen. :

Beispiele: `int i = 017; // dezimal 15`  
`int j = 0xf; // dezimal 15`  
`int b = 0b00101; // binäres Literal, dezimal 5`

Jedes **Literal** hat einen **Datentyp**. Dieser ergibt sich nach dem C++-Standard aus seinem Wert, seiner Form und einem optionalen Suffix. Ohne ein Suffix ist der Datentyp

- eines Dezimalliterals der erste der Datentypen *int*, *long int* oder *long long int*, der den Wert darstellen kann.
- eines Oktal- oder Hexadezimaliterals der erste der Datentypen *int*, *unsigned int*, *long int*, *unsigned long int*, *long long int* oder *unsigned long long int* der den Wert darstellen kann.

Falls der Wert nicht in einem dieser Datentypen dargestellt werden kann, ist sein Datentyp nicht durch den C++-Standard definiert.

Der Datentyp eines Ganzzahliterals kann durch ein **Suffix** festgelegt werden:

*integer-suffix:*  
*unsigned-suffix* *long-suffix* <sub>opt</sub>  
*long-suffix* *unsigned-suffix* <sub>opt</sub>

*unsigned-suffix:* one of  
 u U

*long-suffix:* one of  
 l L



### 2.3.3 Typ-Inferenz: Implizite Typzuweisungen mit *auto*

Bei der Definition einer globalen oder lokalen Variablen mit einer Initialisierung kann anstelle eines Datentyps auch das Schlüsselwort ***auto*** angegeben werden. Dann verwendet der Compiler für diese Variable den Datentyp des Initialisierungs-Ausdrucks. Da der Compiler den Datentyp selbst ableitet, spricht man auch **Typ-Inferenz** oder von **impliziten Typzuweisungen**.

Beispiel: Da der Initialisierungsausdruck 17 in

```
auto i = 17; // wie int i = 17;
```

den Datentyp *int* hat, ersetzt der Compiler *auto* durch *int*. Die Variable *i* erhält so den Datentyp *int*. Der Initialisierungsausdruck kann auch eine Variable oder ein beliebiger Ausdruck sein:

```
auto k = i; // k hat denselben Datentyp wie int i
```

Ohne einen Initialisierungsausdruck führt *auto* zu einer Fehlermeldung des Compilers:

```
auto i ; // Fehler: Initialisierer erforderlich
```

Die Verwendung von *auto* bedeutet nicht, dass die Variable keinen oder einen universellen Datentyp wie in typlosen Sprachen hat. Vielmehr hat sie genau den Datentyp, den der Initialisierungsausdruck hat. Die Angabe *auto* erspart dem Programmierer lediglich, den Namen dieses Datentyps zu schreiben.

Implizite Typzuweisungen bringen bei einfachen Datentypen wie *int* auf den ersten Blick keinen großen Vorteil: Die Vereinfachung des Schreibaufwands ist minimal, und dass der Datentyp der Variablen nicht explizit da steht, macht das Programm nicht immer leichter verständlich. Trotzdem hat *auto* oft Vorteile:

- Da *auto* einen Initialisierungsausdruck verlangt, kann die Initialisierung einer Variablen nicht vergessen werden.
- Da der Datentyp immer der des Initialisierers ist, werden unbeabsichtigte Konvertierungen vermieden.
- Mit *auto* kann man sicherstellen, dass mehrere Variable denselben Datentyp haben. Ändert man im letzten Beispiel den Datentyp von *i*, hat *k* automatisch denselben Datentyp wie *i*, ohne dass man die Definition von *k* ändern muss.
- Bei komplexeren Datentypen (z.B. den Iterator-Klassen der Container-Klassen, siehe Abschnitt 11.1.2) kann *auto* die Schreibarbeit beträchtlich reduzieren.
- In Templates und Lambda-Ausdrücken kann *auto* die einzige Möglichkeit sein, einen Datentyp zu bestimmen.

Deswegen ist es oft empfehlenswert, *auto* gegenüber einer expliziten Typangabe zu bevorzugen.

Eine ausführlichere Darstellung von *auto* folgt in Abschnitt 8.1.11.

### 2.3.4 Initialisierungslisten und Konversionen

Traditionellerweise wird bei einer Zuweisung oder Initialisierung der Wert direkt nach dem Zuweisungsoperator angegeben:

```
int i = 17;
```

Wenn die Datentypen der linken und rechten Seite elementare Datentypen sind, können diese auch verschieden sein. Wie in Abschnitt 2.3.5 gezeigt wird, führt der Compiler dann eine Standardkonversion durch. Eine solche Konversion kann zu Fehlern führen, wenn der Datentyp auf der linken Seite den Wert auf der rechten Seite nicht darstellen kann. Solche Konversionen werden auch als **einschränkende Konversionen** oder Verengungen (engl. narrowing conversion) bezeichnet, da sie mit einem Verlust von Genauigkeit oder sogar völlig falschen Werten verbunden sein kann. Da der Compiler keine Fehlermeldung ausgibt, werden sie leicht übersehen.

Seit C++11 können einschränkende Konversionen mit einer **Initialisierungsliste** unterbunden werden. Dann erzeugt der Compiler bei einer solchen Konversion eine Fehlermeldung.

Eine Initialisierungsliste besteht im einfachsten Fall aus dem zwischen geschweiften Klammern angegebenen Wert. Sie kann bei der **Definition** einer Variablen direkt nach ihrem Namen oder nach ihrem Namen und einem Gleichheitszeichen angegeben werden. Die letzte Schreibweise ist auch bei einer **Zuweisung** möglich.

Beispiel: Die Initialisierung von *i* und *j* mit einer Initialisierungsliste

```
int i{ 17 };    // i=17
int j = { 18 }; // j=18
```

hat denselben Effekt wie eine Initialisierung mit der klassischen Schreibweise

```
int i(17);      // i=17
int j = 18;     // j=18
```

Eine Initialisierungsliste kann auch in einer Zuweisung verwendet werden:

```
i = { 19 };     // wie i=19
```

Den Vorteil der etwas umständlichen Schreibweise von Initialisierungslisten sieht man in den nächsten Beispielen. Gibt man in der Initialisierungsliste einen Wert an, den der Compiler kennt (z.B. ein Literal), muss dieser Wert im Datentyp der linken Seite darstellbar sein. Ansonsten erzeugt der Compiler eine Fehlermeldung.

Beispiel: Mit einem 32-Bit *int*-Datentyp erzeugen die Initialisierungen

```
int i { 100'000'000'000 }; // Fehler: einschränkende
int j = { 100'000'000'000 }; // Konvertierung
```

wie auch die Zuweisung



```
i = { 100'000'000'000 }; // Fehler: einschränkende Konvertierung
```

eine Fehlermeldung. Das ist ein Vorteil gegenüber der traditionellen Schreibweise wie in

```
i = 100'000'000'000; // i = 1'215'752'192
```

bei der keine Prüfung auf den Wert durchgeführt wird. Auch die Zuweisung eines Gleitkommawertes an eine Ganzzahlvariable wird nicht akzeptiert:

```
int k{ 3.0 }; // Fehler: einschränkende Konvertierung
int m = { 6.0 }; // Fehler: einschränkende Konvertierung
```

Gibt man in der Initialisierungsliste einen Wert an, den der Compiler nicht kennt (z.B. eine Variable), muss der Datentyp der linken Seite alle Werte des Datentyps in der Initialisierungsliste darstellen können.

Beispiel: Da *char* nicht alle *int*-Werte darstellen kann, erhält man eine Fehlermeldung

```
int i { 0 };
char c = { i }; // Fehler: einschränkende Konvertierung
```

obwohl *char* den aktuellen Wert von *i* (also 0) darstellen kann:

```
char d = { 0 }; // kein Fehler
```

Eine Initialisierungsliste kann **leer** sein oder für entsprechende Datentypen (z.B. Container) auch **mehrere Werte** enthalten.

Beispiel: Bei einem elementaren Datentyp erhält man mit einer leeren List den Wert 0 und bei einem Klassentyp der Wert, den man mit dem Standardkonstruktor erhält.

```
int i{}; // wie int i=0;
```

In Abschnitt 11.1.1 wird gezeigt, dass man einen Vektor so initialisieren kann:

```
vector<int> v{ 1, 3, 5 };
```

Initialisierungslisten können für nahezu alle Initialisierungen verwendet werden: Nicht nur für elementare Datentypen, sondern auch für Klassen (siehe Abschnitt 8.1.9).

In den [C++ Core Guidelines](#) (siehe Abschnitt 2.13) wird **ausdrücklich empfohlen**, **Initialisierungslisten** gegenüber den traditionellen Schreibweisen zu bevorzugen. Damit kann man insbesondere bei Programmen, die für 32- und 64-Bit Plattformen kompiliert werden, Fehler vermeiden, die leicht übersehen werden.

### 2.3.5 Zuweisungen und Standardkonversionen bei Ganzzahlausdrücken $\Theta$

**Standardkonversionen** sind Konversionen für die vordefinierten Datentypen, die der Compiler implizit (d.h. automatisch) durchführt. Sie werden z.B. dann durchgeführt, wenn

an eine Variable eines vordefinierten Datentyps T ein Wert eines anderen Datentyps zugewiesen wird:

Beispiel: Für alle vordefinierten Ganzzahldatentypen sind Standardkonversionen definiert. Deswegen wird

```
int i = -1;
unsigned int u = i;
```

kompiliert, obwohl ein *unsigned int* keine negativen Werte darstellen kann.

Dieses Kapitel zeigt, wie der Compiler bei Standardkonversionen vorgeht, und welche diffizilen Probleme damit verbunden sein können. Diese Konversionen gehen auf die Anfangszeiten von C (ca. 1970) zurück und wurden aus Gründen der Abwärtskompatibilität in C++ übernommen. Diese Probleme werden vermieden, wenn man

- keine Datentypen mischt (z.B. bei Ganzzahldatentypen immer *int* verwendet) oder
- die in Abschnitt 2.3.4 beschriebenen Initialisierungslisten verwendet

Falls Sie diese beiden Anforderungen einhalten, können Sie den Rest dieses Abschnitts übergehen. Es ist aber sicher auch kein Fehler, zu sehen, welche Fallstricke mit den Standardkonversionen verbunden sein können. Dann lesen Sie diesen Abschnitt doch durch und freuen sich dann, dass Sie sich nicht mit diesen Problemen herumärgern müssen.

Die Standardkonversionen sind im C++-Standard definiert und werden z.B. in den folgenden Situationen durchgeführt:

- Wenn ein Ausdruck als Operand eines Operators verwendet wird (siehe Abschnitt 2.3.6). So wird z.B. bei der Zuweisung `v=a` der Ausdruck `a` in den Datentyp von `v` konvertiert.
- Wenn beim Aufruf einer Funktion für einen Parameter eines Datentyps T1 ein Argument eines anderen Datentyps T2 eingesetzt wird.

Insbesondere sind Standardkonversionen für alle Ganzzahldatentypen definiert. Deshalb können in einer Zuweisung

```
v=a
```

beliebige Ganzzahldatentypen von `a` und `v` kombiniert werden. Falls dabei die **Datentypen** von `v` und `a` **identisch** sind, wird durch die Zuweisung einfach das Bitmuster von `a` an die Adresse von `v` kopiert, so dass der Wert von `v` mit dem von `a` identisch ist. Sind die beiden **Datentypen** dagegen **verschieden**, wird der Datentyp der rechten Seite durch eine der folgenden Konversion in den Datentyp der linken Seite konvertiert:

1. Ausdrücke der Datentypen *bool*, *char*, *signed char*, *unsigned char*, *short int* oder *unsigned short int* werden in den Datentyp *int* konvertiert.
2. Bei der Konversion einer Zahl `a` in einen `n` bit breiten Ganzzahldatentyp ohne Vorzeichen besteht das Ergebnis gerade aus den letzten `n` Bits von `a`.
3. Bei der Konversion in einen Ganzzahldatentyp mit Vorzeichen wird der Wert nicht verändert, wenn er im Ziel-Datentyp exakt dargestellt werden kann. Andernfalls ist das Ergebnis nicht durch den C++-Standard festgelegt.

Die erste Konversion betrifft nur Konversionen „kleinerer“ Datentypen als *int* in den Datentyp *int* und wird auch als **ganzzahlige Typangleichung (integral promotion)** bezeichnet. Die letzten heißen auch **ganzzahlige Typumwandlungen (integral conversion)**.

Beispiel: Gemäß der Regeln 2. und 3. werden die folgenden Zuweisungen alle von Visual C++ übersetzt. Obwohl keiner der zugewiesenen Werte im Wertebereich des Datentyps der linken Seite liegt, gibt Visual C++ mit dem voreingestellten Warnlevel keine Warnung aus.

```
int a = -257;
char v1 = a;           // v1=='ÿ' (-1)
unsigned int v2 = a;   // v2==4294967039
unsigned int b = 2147483648; // INT_MAX+1
char v3 = b;           // v3= 0
int v4 = b;            // v4== -2147483648
```

Mit einer Initialisierungsliste werden die Zuweisungen an v1, v2, v3 und v4 vom Compiler zurückgewiesen:

```
int a = 257;
char v1{ a };           //Fehler: einschränkende Konvertierung
unsigned int v2{ a };   //Fehler: einschränkende Konvertierung
unsigned int b = { 2147483648 }; // INT_MAX+1
char v3{ b };           //Fehler: einschränkende Konvertierung
int v4{ b };            //Fehler: einschränkende Konvertierung
```

Eine Konversion, bei der der Zieldatentyp alle Werte des konvertierten Datentyps darstellen kann, wird als **sichere Konversion** bezeichnet. Die ganzzahligen Typangleichungen für die folgenden Datentypen sind sichere Konversionen:

```
unsigned char → unsigned short → unsigned int → unsigned long
signed char   → short           → int         → long
```

Bei einem 32-bit-Rechner sind hier außerdem noch diese Konversionen sicher:

```
unsigned char → short      unsigned short → int
```

Da Ganzzahl-literale einen Ganzzahldatentyp haben, können sie in einen beliebigen anderen Ganzzahltyp konvertiert werden. Falls der Wert des Literals nicht im Wertebereich des anderen Datentyps liegt, können die impliziten Konversionen zu überraschenden Ergebnissen führen.

Beispiel: Die folgenden Zuweisungen werden von Visual C++ ohne Fehlermeldungen übersetzt:

```
// #define INT_MAX 2147483647
int k = 2147483648; // =INT_MAX+1
cout << k << endl; // -2147483648
```

```
int m = 12345678901234567890; // warning: Verkürzung von
                               // '_int64' zu 'int'
cout << m << endl; // m=-350287150
```

Hier ist das an `k` und `m` zugewiesene Literal zu groß für den Datentyp `int`. Die ausgegebenen Werte entsprechen vermutlich nicht unbedingt den Erwartungen.

Offensichtlich können harmlos aussehende Zuweisungen zu Ergebnissen führen, die auf den ersten Blick überraschend sind. Nicht immer wird durch eine Warnung auf ein solches Risiko hingewiesen. Bei einem umfangreichen Programm mit vielen Warnungen werden diese auch leicht übersehen.

Die Verantwortung für die gelegentlich überraschenden Folgen der impliziten Konversionen liegt deshalb letztendlich immer beim Programmierer: Er muss bei der Wahl der Datentypen stets darauf achten, dass sie nur zu sicheren Konversionen führen. Das erreicht man **am einfachsten** dadurch, dass man als Ganzzahldatentyp **immer denselben Datentyp** verwendet. Da der Datentyp eines Dezimalliterals meist `int` ist, liegt es nahe, immer diesen Datentyp zu wählen. Oder man verwendet immer Initialisierungslisten.

Die Empfehlung für `int` steht im Gegensatz zu einer anderen Empfehlung, die man relativ oft findet, nämlich **Datentypen minimal zu wählen**. Danach sollte man einen Datentyp immer möglichst klein wählen, aber dennoch groß genug, damit er alle erforderlichen Werte darstellen kann. Das führt zu einem minimalen Verbrauch an Hauptspeicher, erfordert allerdings eine gewisse Sorgfalt bei impliziten Konversionen.

Beispiel: Für eine Variable, die einen Kalendertag im Bereich 1..31 darstellen soll, ist der Datentyp `char` oder `unsigned char` ausreichend. Da beide Datentypen sicher in den Datentyp `int` konvertiert werden können, spricht auch nichts gegen diese Datentypen.

Für eine Variable, die eine ganzzahlige positive Entfernung darstellen soll, ist auf den ersten Blick der Datentyp `unsigned int` naheliegend. Da die Konversion dieses Datentyps in `int` nicht sicher ist, sollte stattdessen `int` bevorzugt werden.

Am einfachsten ist es, wenn man für alle diese Variablen den Datentyp `int` verwendet.

### 2.3.6 Operatoren und die „üblichen arithmetischen Konversionen“

Für Ganzzahloperanden sind unter anderem die folgenden **binären Operatoren** definiert. Sie führen zu einem Ergebnis, das wieder einen Ganzzahldatentyp hat:

- `+` Addition
- `-` Subtraktion
- `*` Multiplikation
- `/` Division, z.B.  $7/4=1$
- `%` Rest bei der ganzzahligen Division, z.B.  $7\%4 = 3$

Für  $y \neq 0$  gilt immer:

$$(x / y) * y + (x \% y) = x.$$

Das Ergebnis einer %-Operation mit nicht negativen Operanden ist immer positiv. Falls einer der Operanden negativ ist, ist das Vorzeichen des Ergebnisses im C++-Standard nicht festgelegt.

Im C++-Standard ist explizit nicht festgelegt, wie sich ein Programm verhalten muss, wenn bei der Auswertung eines Ausdrucks ein Überlauf oder eine unzulässige Operation (wie z.B. eine Division durch 0) stattfindet. Die meisten Compiler (wie auch Visual C++) ignorieren einen Überlauf und rechnen modulo  $2^n$ . Bei einer Division durch 0 wird das Programm abgebrochen.

Beispiele: Das Vorzeichen von  $x/y$  ergibt sich nach den üblichen Regeln:

```
i = 17 / -3;    // i == -5
j = -17 / 3;    // j == -5
k = -17 / -3;   // k == 5
```

Mit dem %-Operator kann man z.B. feststellen, ob eine Ganzzahl ein Vielfaches einer anderen Ganzzahl ist.

```
if ((i % 2) == 0) // nur für gerade Werte von i erfüllt
```

In Zusammenhang mit den binären Operatoren stellt sich die Frage, welchen Datentyp das Ergebnis hat, wenn der Datentyp der beiden Operanden verschieden ist wie z.B. in

```
short s;
char c;

... = c + s;
```

C++ geht dabei in zwei Stufen vor, die auch als die **üblichen arithmetischen Konversionen** bezeichnet werden. Sie konvertieren die Operanden in einen **gemeinsamen Datentyp**, der dann auch der Datentyp des Ausdrucks ist. Für Ganzzahldatentypen sind sie folgendermaßen definiert:

- In einem ersten Schritt werden alle Ausdrücke der Datentypen *char*, *signed char*, *unsigned char*, *short int* oder *unsigned short int* durch eine **ganzzahlige Typangleichung** (siehe Seite 53) in den Datentyp *int* konvertiert.
- Falls der Ausdruck nach dieser Konvertierung noch verschiedene Datentypen enthält, ist der gemeinsame Datentyp der erste in der Reihe

*unsigned long int*, *long int*, *unsigned int*

wenn einer der Operanden diesen Datentyp hat. Der gemeinsame Datentyp von *long int* und *unsigned int* ist in 32-bit Visual C++ *unsigned long int*.

Beispiele:

1. Für zwei *char*-Variable

```
char ca = 65; // 'A'
char cb = 0;
```

hat  $ca+cb$  durch eine ganzzahlige Typangleichung den Datentyp *int* und nicht etwa *char*:

```
auto x = ca + cb; // int x
char c = { x }; // Fehler: Konvertierung von "int" zu "char" ...
```

2. Für eine Variable *u* des Datentyps *unsigned int* wird der zweite Operand des Ausdrucks  $u-1$  ebenfalls in den Datentyp *unsigned int* konvertiert. Deshalb hat dieser Ausdruck mit  $u=0$  den Wert 4294967295 und nicht den Wert  $-1$ . In

```
unsigned int u = 0;
int i = 1 / (u-1);
```

erhält man so den Wert  $i=0$  und nicht etwa den Wert  $i=-1$ . Mit

```
int i = u-1;
```

erhält *i* dagegen den Wert  $-1$ , da der *unsigned* Wert in *int* konvertiert wird.

Das erste Beispiel zeigt insbesondere, dass sich der Datentyp eines Ausdrucks allein aus dem Datentyp der Operanden ergibt. Falls der Ausdruck einer Variablen zugewiesen wird, beeinflusst der Datentyp, an den die Zuweisung erfolgt, den Datentyp des Ausdrucks nicht.

Auch auf diese Konversion wird man bei der Verwendung von Initialisierungslisten vom Compiler hingewiesen:

```
int i{ 1 / (u - 1) }; // Fehler: einschränkende Konvertierung
int j{ u - 1 };      // Fehler: einschränkende Konvertierung
```

3. Auch die Operanden der **Vergleichs- oder Gleichheitsoperatoren** werden mit den **üblichen arithmetischen Konversionen** in einen gemeinsamen Datentyp konvertiert. Deshalb werden nach der Definition

```
unsigned int ui = 1;
```

die beiden Operanden in der Bedingung ( $ui > -1$ ) in den gemeinsamen Datentyp *unsigned int* konvertiert. Dadurch wird das Bitmuster 0xFFFFFFFF des *int*-Werts  $-1$  als *unsigned int*-Wert interpretiert. Da kein Wert größer als dieser Wert sein kann, wird durch

```
if (ui > -1) cout << "1 > -1" << endl;
else cout << "1 <= -1" << endl;
```

„1 <= -1“ ausgegeben, obwohl man auf den ersten Blick wohl „1 > -1“ erwarten würde. Der Compiler gibt dazu auch mit dem Warnlevel W3 keine Warnungen aus:

Neben den binären gibt es die **unären Operatoren**  $+$  und  $-$ . „ $+$ “ ändert den Wert des Operanden nicht. „ $-$ “ sollte nur auf Datentypen mit Vorzeichen angewandt werden. Man

muss aber beachten, dass aufgrund der Asymmetrie der Wertebereiche dieser Datentypen für den kleinsten Wert *min* nicht  $-(-min) = min$  sein kann:

```
short i = -32768; // Wertebereich von short: -32768..32767
i = -i; // i = -32768
```

Mit einer Initialisierungsliste wird die Initialisierung von *i* nicht akzeptiert:

```
short i1{ 32768 }; // Fehler: einschränkende Konvertierung
```

Für Operanden eines Ganzzahldatentyps sind die **bitweisen Operatoren** **&** (*bitand*), **|** (*bitor*) und **^** (*xor*) definiert. Nach den üblichen arithmetischen Konversionen der Operanden werden ihre einzelnen Bits gemäß der folgenden Tabelle verknüpft. Der Operator **~** negiert die einzelnen Bits und erzeugt so das Einerkomplement:

| p | q | p & q | p   q | p ^ q | ~p |
|---|---|-------|-------|-------|----|
| 1 | 1 | 1     | 1     | 0     | 0  |
| 1 | 0 | 0     | 1     | 1     | 0  |
| 0 | 1 | 0     | 1     | 1     | 1  |
| 0 | 0 | 0     | 0     | 0     | 1  |

Diese Operatoren werden oft dazu verwendet, einzelne Bits bei Ganzzahldatentypen ohne Vorzeichen zu setzen oder zu löschen. Die Operanden sollen aber keine Datentypen mit Vorzeichen haben, sondern nur Datentypen ohne Vorzeichen (also z.B. *unsigned int*).

Beispiel: Durch

```
unsigned int m = 3, n = 0x0000ffff, i, j;
i = i | m;
j = j & n;
```

werden die niedrigstwertigen beiden Bits von *i* gesetzt, unabhängig davon, welchen Wert *i* zuvor hatte. Die obersten 16 Bits von *j* werden auf 0 gesetzt, und die unteren 16 Bits bleiben unverändert:

Durch die **Inkrement- und Dekrementoperatoren**

**++, --**

wird der Wert des Operanden um 1 erhöht bzw. reduziert. Beide können als Präfix- und als Postfixoperator verwendet werden. Wenn man einen solchen Ausdruck wie in

```
i++; ++i; bzw.
i--; --i;
```

als eigenständige Anweisung verwendet, ist das Ergebnis des Präfix- und Postfixoperators gleichwertig. Weist man einen solchen Ausdruck in derselben Anweisung einer Variablen zu, erhält die Variable beim Präfixoperator einen anderen Wert als beim Postfixoperator.

- Bei den Postfixoperatoren ist der Wert des Ausdrucks der Wert des Operanden vor der Erhöhung bzw. Reduzierung:

```
int i = 0, j = 0, k;
k = i++; // k=0, i=1
k = j--; // k=0, j=-1
```

- Dagegen ist bei den Präfixoperatoren der Wert des Ausdrucks der Wert des Operanden nach der Erhöhung bzw. Reduzierung:

```
int i = 0, j = 0, k;
k = ++i; // k=1, i=1
k = --j; // k=-1, j=-1
```

Wenn man sich über diese diffizilen Unterschiede nicht ganz sicher ist, empfiehlt es sich, diese Operatoren nur als eigenständige Anweisungen zu verwenden. Die Präfixoperatoren sind bei manchen Datentypen ein klein wenig schneller. Bei fundamentalen Datentypen (wie z.B. *int*) besteht meist kein Laufzeitunterschied (siehe Abschnitt 2.5.2).

Beispiel: Diese beiden *for*-Anweisungen (siehe Abschnitt 2.4.2) haben denselben Effekt.

```
for (int i = 0; i < n; i++) ...
for (int i = 0; i < n; ++i) ...
```

Der Operator ***sizeof*** gibt die Anzahl der Bytes zurück, die ein Ausdruck bzw. eine Variable eines Datentyps belegen. Der Operand ist entweder ein Ausdruck oder ein Datentyp, der in Klammern angegeben wird:

```
sizeof unary-expression
sizeof ( type-id )
```

Das Ergebnis ist eine Konstante des Datentyps ***size\_t***. Das ist ein vorzeichenloser Ganzzahl-Datentyp, der nach `#include <cstdint>` zur Verfügung steht. Bei Visual C++ ist das *unsigned long long*, bei manchen anderen Compilern *unsigned int*.

Beispiel:

```
int sc = sizeof(char); // 1
int sh = sizeof(short); // 2
int si = sizeof(int); // 4
short s;
int vs = sizeof(s); // 2
int v = sizeof(s + 0); // 4, ganzzahlige Typangleichung
```

### Aufgaben 2.3.6

1. a) Welchen Wert haben die Variablen b, c, d, e und f nach den Zuweisungen

```
unsigned char b = 255;
unsigned char c = 0;
int i = 1234567898;
```



```

b = b + 1;
c = c - 1;
int d = i / 100;
int e = i % 100;
int f = i + i

```

- b) Welche der Zuweisungen in a) sind zulässig, wenn die rechte Seite in einer Initialisierungsliste angegeben wird?
2. Beschreiben Sie für beliebige positive Werte von  $i$  und  $j$  (beide Ganzzahldatentypen) das Ergebnis von

$$(i/j) * (j/i)$$

3. Beschreiben Sie für einen ganzzahligen Operanden  $x$  das Ergebnis von

- a) `int a = x^x;`  
 b) `int b = x & 1;`

4. Welche Voraussetzungen müssen für das Bitmuster der *int*-Werte  $x$  und  $y$  gelten, damit die folgenden drei Ausdrücke gleich sind?

$$x|y, \quad x+y, \quad x^y$$

### 2.3.7 Die Datentypen *char* und *wchar\_t*

Eine Variable des Datentyps *char* (für character, Zeichen) kann ein einzelnes Zeichen des dem System zugrunde liegenden Zeichensatzes darstellen.

Alle diese Zeichensätze sind eine Obermenge des **ASCII-Zeichensatzes**, in dem die Zeichen mit den Nummern 0 bis 127 standardisiert sind. Von diesen sind die Zeichen mit den Nummern 32 bis 126 druckbare Zeichen. Die Zeichen 0 .. 31 werden oft als Steuerzeichen (z.B. zur Datenfernübertragung und Druckersteuerung) verwendet.

Die Zeichen Nr. 32 (Leerzeichen) bis 126 im ASCII-Zeichensatz:

|     | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6  | 7 | 8 | 9 |
|-----|---|---|---|---|---|---|----|---|---|---|
| 30  |   |   |   | ! | " | # | \$ | % | & | ' |
| 40  | ( | ) | * | + | , | - | .  | / | 0 | 1 |
| 50  | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8  | 9 | : | ; |
| 60  | < | = | > | ? | @ | A | B  | C | D | E |
| 70  | F | G | H | I | J | K | L  | M | N | O |
| 80  | P | Q | R | S | T | U | V  | W | X | Y |
| 90  | Z | [ | \ | ] | ^ | _ | `  | a | b | c |
| 100 | d | e | f | g | h | i | j  | k | l | m |
| 110 | n | o | p | q | r | s | t  | u | v | w |
| 120 | x | y | z | { |   | } | ~  |   |   |   |

Einige Steuerzeichen:

```

8: BS    // Backspace - ein Zeichen zurück
10: LF   // Linefeed - Zeilenvorschub
12: FF   // Formfeed - Blattvorschub
13: CR   // Carriage Return - Wagenrücklauf
27: ESC  // Escape - Altdeutsch: Fluchtsymbol

```

Die Zeichen 128 .. 255 können unter verschiedenen Systemen (MS-DOS, Windows usw.) eine verschiedene Bedeutung haben.

Beispiele: Unter Windows wird der **ANSI-Zeichensatz** verwendet. Ein Auszug:

|     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|     | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 190 | ¼ | ½ | ¾ | À | Á | Â | Ã | Ä | Å | Ç |
| 200 | È | É | Ê | Ë | Ì | Í | Î | Ï | Ð | Ñ |
| 210 | Ò | Ó | Ô | Õ | Ö | × | Ø | Ù | Ú | Û |
| 220 | Ü | Ý | Þ | ß | à | á | â | ã | ä | å |
| 230 | æ | ç | è | é | ê | ë | ì | í | î | ï |
| 240 | ð | ñ | ò | ó | ô | õ | ö | ÷ | ø | ù |
| 250 | ú | û | ü | ý | þ | ÿ |   |   |   |   |

In allen Zeichensätzen wird ein **Zeichen** durch seine **Nummer im Zeichensatz dargestellt**. Das Zeichen 'A' wird also durch die Zahl 65<sub>10</sub> dargestellt. Das Zeichen mit der Nummer 0 (dessen Bitmuster ausschließlich aus Nullen besteht), wird auch als **Nullzeichen** bezeichnet.

Ein **Literal** des Typs *char* wird im einfachsten Fall durch einfache Hochkommas begrenzt und enthält ein Zeichen des zugrunde liegenden Zeichensatzes:

Beispiel: `char c = 'A';`  
`c = 'ä';`

Da der Datentyp *char* ein Ganzzahldatentyp ist, kann man einer Variablen des Datentyps *char* auch einen Ganzzahlwert zuweisen.

Beispiele: `char c = 27; // ESC`  
`c = 65; // 'A'`  
`char NullZeichen = 0;`

Einige spezielle Zeichen können als **Escape-Sequenz** dargestellt werden. Eine Escape-Sequenz beginnt mit \:

*simple-escape-sequence*: one of  
 \ ' \ " \ ? \ \ \ a \ b \ f \ n \ r \ t \ v

Die einfachen Escape-Sequenzen bedeuten im Einzelnen:

|    | Wert (dez.) | Symbol | Bedeutung                               |
|----|-------------|--------|-----------------------------------------|
| \a | 7           | BEL    | Alarmton                                |
| \b | 8           | BS     | Backspace                               |
| \t | 9           | HT     | horizontaler Tabulator                  |
| \n | 10          | LF     | Zeilenvorschub                          |
| \v | 11          | VT     | vertikaler Tabulator                    |
| \f | 12          | FF     | Seitenvorschub                          |
| \r | 13          | CR     | Wagenrücklauf (Carriage Return)         |
| \" | 34          | "      | doppeltes Anführungszeichen             |
| \' | 39          | '      | einfaches Anführungszeichen (Apostroph) |
| \? | 63          | ?      | Fragezeichen                            |
| \\ | 92          | \      | Backslash (umgekehrter Schrägstrich)    |

Beispiele: `char c = '\\';`  
`c = '\n'; // newline-Zeichen`

Da \" immer als erstes Zeichen einer Escape-Sequenz interpretiert wird, muss dieses Zeichen in einer Pfadangabe in einem String doppelt angegeben werden. Anstelle von „\\“ ist bei **Pfadangaben** in Windows auch „/“ möglich.

Beispiel: Die nächsten beiden Pfadangaben sind gleichwertig:

```
auto Dateiname1 = "c:\\Projekt1\\Projekt1";
auto Dateiname1 = "c:/Projekt1/Projekt1";
```

Obwohl eine Escape-Sequenz aus zwei oder mehr Zeichen besteht, stellt sie ein einzelnes Zeichen mit dem Wert aus der Spalte *Wert* dar.

Da *char*-Werte durch ihre Nummern im verwendeten Zeichensatz dargestellt werden, können sie wie Zahlen mit einem der Vergleichsoperatoren <, <= (für ≤), >, >= (für ≥), == und != (für ≠) verglichen werden:

```
if ((c >= 'A') && (c <= 'Z')) ...
```

Da im ASCII-Zeichensatz jeweils Ziffern, Groß- und Kleinbuchstaben in der üblichen Reihenfolge aufeinander folgen, wird durch diese Abfrage also geprüft, ob das Zeichen c ein Großbuchstabe ist oder nicht.

Es gibt drei *char*-Datentypen: *char*, *signed char* und *unsigned char*. Nach dem C++-Standard sind das drei verschiedene Datentypen, die jeweils 1 Byte belegen. Der Datentyp *char* muss entweder dieselbe Darstellung wie *signed char* oder *unsigned char* verwenden. Es ist aber explizit offengelassen, welche von beiden. Visual C++ verwendet als **Voreinstellung** den Datentyp *signed char*.

Beispiel: Mit *char* als signed Typ erhält man in

```
for (char c = 0; c < 255; c++)
    ...
```

eine Endlosschleife, obwohl diese Anweisung ohne Warnung kompiliert wird.

Die C/C++-**Standardbibliotheken** enthalten zahlreiche Funktionen für den Datentyp *char*. Die folgenden Funktionen stehen nach

```
#include <ctype.h>
```

zur Verfügung. Die Funktion ***toupper*** wandelt ein Argument, das einen Kleinbuchstaben ('a..'z') im ASCII-Zeichensatz darstellt, in den entsprechenden Großbuchstaben um. Andere Argumente werden unverändert zurückgegeben. Entsprechend wandelt ***tolower*** eine Zahl, die einen Großbuchstaben darstellt, in den entsprechenden Kleinbuchstaben um:

```
int toupper(int ch); // c=toupper('a') ergibt c='A'
int tolower(int ch);
```

Da die Buchstaben sowohl im Bereich der Groß- als auch der Kleinbuchstaben in derselben Reihenfolge aufeinander folgen, entspricht *tolower* der Anweisung:

```
if ((c >= 'A') && (c <= 'Z'))
    c = c - 'A' + 'a';
```

Da deutsche Umlaute (ä, ö usw.) nicht zum ASCII-Zeichensatz gehören, werden sie bei diesen Funktionen nicht berücksichtigt.

Mit weiteren Funktionen kann man prüfen, zu welcher Gruppe ein Zeichen gehört. Alle diese Funktionen haben den Funktionswert 0, wenn das übergebene Zeichen nicht zu der Gruppe gehört, und andernfalls den Wert 1:

```
int isalpha (int __c); // Buchstabe
int isupper (int __c); // Großbuchstabe
int islower (int __c); // Kleinbuchstabe
int isdigit (int __c); // Ziffer
int isalnum (int __c); // alphanumerisch
int isspace (int __c); // Whitespace (blank, tab usw.)
int isxdigit(int __c); // Hexadezimalziffer
int iscntrl (int __c); // Steuerzeichen
```

Alle diese Funktionen sind auf Zeichen des ASCII-Zeichensatzes beschränkt.

Die *char*-Datentypen verwenden ein Byte zur Darstellung eines Zeichens. Die damit möglichen 256 verschiedenen Zeichen sind jedoch für Sprachen mit einer größeren Anzahl von Zeichen (z.B. asiatische und arabische) nicht ausreichend. C++ unterstützt solche Zeichen durch die Datentypen ***wchar\_t***, ***char16\_t***, ***char32\_t***:

- Werte des Typs ***wchar\_t*** werden auch als **Multibyte-Zeichen** oder „wide char“ bezeichnet. Literale dieses Typs müssen mit einem L beginnen.

Beispiel: ***wchar\_t*** w = L'A';

Für diesen Datentyp stehen in <ctype.h> Funktionen wie

```
int towupper(wint_t c);
```

(mit einem zusätzlichen „w“ im Namen) zur Verfügung, die nicht nur ASCII-Zeichen, sondern auch nationale Sonderzeichen wie z.B. Umlaute berücksichtigen.

- **char16\_t** und **char32\_t** stellen Zeichen durch einen sogenannten Code-Punkt mit 16 oder 32 Bits im **Unicode**-Standard dar. Unicode umfasst praktisch alle Zeichen aller verschiedenen nationalen Schriftarten, einschließlich technischer und typografischer Sonderzeichen. Unicode-Zeichen im Bereich 0 .. 255 sind mit denen des ANSI-Zeichensatzes identisch. Literale dieser Typen müssen mit einem u (Kleinbuchstabe) oder einem U (Großbuchstabe) beginnen. :

Beispiel: `char16_t u1 = u'A';`  
`char32_t u2 = U'A';`

### 2.3.8 Der Datentyp *bool*

Der Datentyp **bool** ist ein vordefinierter Ganzzahldatentyp, der die Werte *true* und *false* annehmen kann. Diese Werte sind die booleschen Literale :

```
boolean-literal:
    false
    true
```

Damit sind nach der Definition

```
bool b;
```

diese Zuweisungen möglich:

```
b = true;
b = false;
```

Diesen Datentyp erhält man aber nicht nur bei entsprechend definierten Variablen. Vielmehr hat in C++ jeder Ausdruck, der mit einem der **Vergleichs- oder Gleichheitsoperatoren** `<`, `<=` (für  $\leq$ ), `>`, `>=` (für  $\geq$ ), `==` (für  $=$ ) und `!=` (für  $\neq$ ) gebildet wird, den Datentyp *bool* und damit einen der beiden Werte *true* oder *false*. Wenn also in einem Programm

```
if (x < 17) ...
```

geschrieben wird, ist „`x<17`“ ein boolescher Ausdruck, der entweder den Wert *true* oder *false* hat.

Ein boolescher Ausdruck kann einer booleschen Variablen zugewiesen werden:

```
bool b = (x < 17);
```

Hier erhält *b* den Wert *true*, falls der Wert von *x* kleiner als 17 ist, und andernfalls den Wert *false*. Diese Zuweisung ist einfacher als

```
if (x < 17) b = true;
else b = false;
```

Eine boolesche Variable kann direkt in einer *if*-Anweisung verwendet werden:

```
if (b) ...
```

Dabei ist es nicht notwendig, sie mit dem Wert *true* zu vergleichen:

```
if (b == true) ... // umständlich
```

Für boolesche Ausdrücke sind die binären **logischen Operatoren** **&&** und **||** sowie der unäre logische Operator **!** definiert. Anstelle von **&&**, **||** usw. kann man auch die alternativen Schlüsselworte **and**, **or**, **xor** usw. verwenden:

| p     | q     | p && q<br>p <i>and</i> q | p    q<br>p <i>or</i> q | p ^ q<br>p <i>xor</i> q | p != q<br>p <i>not eq</i> q | !p<br><i>not</i> p |
|-------|-------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------|
| true  | true  | true                     | true                    | false                   | true                        | false              |
| true  | false | false                    | true                    | true                    | false                       | false              |
| false | true  | false                    | true                    | true                    | false                       | true               |
| false | false | false                    | false                   | false                   | true                        | true               |

Deshalb kann man in einer *if*-Anweisung boolesche Ausdrücke verknüpfen oder negieren.

Beispiel: Traditionellerweise verwendet man für die booleschen Operationen die Operatoren **&&**, **||** und **!**:

```
if ((x >= 0) && (x <= 17)) i++;
if (!b) i++;
if (x != y);
```

Mit den alternativen Schlüsselworten erhält man dasselbe Ergebnis:

```
if ((x >= 0) and (x <= 17)) i++;
if (not b);
if (x not_eq y);
```

Bei einer solchen Verknüpfung können die Klammern auch ausgelassen werden:

```
if (x >= 0 && x <= 17) ...
```

Da die Prioritäten der einzelnen Operatoren aber durch ein recht umfangreiches Regelwerk beschrieben werden, besteht die Gefahr von Missverständnissen. Deshalb empfiehlt es sich immer, alle binären Ausdrücke zu klammern.

Die Bedeutung des **umgangssprachlichen „und“** bzw. **„oder“** kann von der von **&&** bzw. **||** (die auch als **„logisches und“** bzw. **„logisches oder“** bezeichnet werden) abweichen. Es empfiehlt sich deshalb, bei jeder solchen Verknüpfung noch einmal kurz nachzudenken, ob man jetzt wirklich ein **&&** oder ein **||** braucht.

Beispiel: Die umgangssprachliche Aussage „Ich besuche dich heute oder morgen.“ wird meist als falsch betrachtet, wenn ich die angesprochene Person heute und morgen besuche. Das „oder“ hat hier die Bedeutung eines „ausschließenden oder“ (xor). Verknüpft man dagegen die beiden Einzelaussagen

p = „Ich besuche dich heute.“  
q = „Ich besuche dich morgen.“

mit  $\parallel$ , ist  $p \parallel q$  auch dann wahr, wenn beide Aussagen p und q wahr sind.

Allerdings muss das „logische und“ bzw. „oder“ nicht vom umgangssprachlichen abweichen. Es gibt viele Beispiele, wo sie gleich sind.

Zwischen dem Datentyp *bool* und den anderen Ganzzahldatentypen sind **implizite Standardkonversionen** definiert. Durch eine **ganzzahlige Typangleichung** wird der Wert *true* in 1 und der Wert *false* in 0 konvertiert. Der Wert 0 wird in *false* und jeder andere Wert wird in *true* konvertiert. Diese Konversionen finden z.B. dann statt, wenn einer Ganzzahlvariablen ein *bool*-Wert zugewiesen wird oder umgekehrt:

```
int i = true; // i=1;
int j = false; // j=0
bool b = 0; // b=false
bool d = 17; // d=true
```

Durch diese Standardkonversionen wird insbesondere die Kompatibilität zur Programmiersprache C hergestellt, in der es den Datentyp *bool* nicht gibt. In C wird der Wert 0 als *false* und jeder andere Wert als *true* interpretiert.

Diese Konversionen werden oft dazu verwendet, für einen Ausdruck i die Bedingung „i==0“ kürzer zu formulieren, indem man sie durch „!i“ ersetzt:

```
if (!(i % 2)) // gleichwertig mit "if (i%2==0)"
```

Wegen dieser Konversionen kann der Compiler allerdings den folgenden subtilen **Schreibfehler**, der leicht vorkommen kann, nicht entdecken:

```
if (x = 10) // Schreibfehler: gemeint ist "if (x==10)"
```

Da in C++ eine Zuweisung wie „x=10“ ein Ausdruck ist, der den Wert der rechten Seite hat (hier also 10), ist die Bedingung unabhängig vom Wert von x immer erfüllt, da der Wert 10 als *true* interpretiert wird. Als Folge dieses Schreibfehlers erhält x auch noch den Wert 10.

Kombiniert man einen booleschen Ausdruck und einen Ganzzahlausdruck mit einem binären Operator, wird der Wert des booleschen Ausdrucks durch eine **ganzzahlige Typangleichung** immer in einen Ganzzahltyp konvertiert.

Beispiele: In

```
if (0 <= x <= 10) ..
```

wird zuerst der linke Teilausdruck „ $0 \leq x$ “ als boolescher Ausdruck ausgewertet. Das Ergebnis wird dann in einen der Werte 0 oder 1 konvertiert und mit 10 verglichen. Deshalb hat der gesamte Ausdruck immer den Wert *true*, unabhängig vom Wert von *x*.

Die folgenden Anweisungen werden mit Warnungen (aber ohne Fehler) übersetzt:

```
bool b = 7; //warning: Verkürzung von 'int' in 'bool'
if (b == 7) //warning: '==' : unsichere operation,...
    cout << "b==7" << endl;
else
    cout << "b!=7" << endl;
```

In der ersten Anweisung wird 7 in den Wert *true* konvertiert. Dieser Wert wird dann in  $(b == 7)$  in den Wert 1 konvertiert. Deswegen hat der Ausdruck  $(b == 7)$  immer den Wert *false*.

Mit einer Initialisierungsliste erhält man eine Fehlermeldung:

```
bool b{ 7 }; // Fehler: einschränkende Konvertierung
```

Die logischen Operatoren  $\&\&$  und  $\|$  sind kommutativ, d.h. für boolesche Ausdrücke *p* und *q* haben

$p \&\& q$  und  $q \&\& p$ , sowie  
 $p \| q$  und  $q \| p$

jeweils dasselbe Ergebnis. Allerdings müssen bei einem solchen Ausdruck nicht immer alle Operanden ausgewertet werden, um sein Ergebnis zu bestimmen: Sobald in einem mit  $\&\&$  verknüpften Ausdruck einer der Operanden *false* ist, kann das Gesamtergebnis nicht mehr *true* werden. Ebenso kann das Ergebnis nicht mehr *false* werden, falls einer der Operanden bei einem mit  $\|$  verknüpften Ausdruck *true* ist. Dann ist die Auswertung der restlichen Bedingungen des Gesamtausdrucks nicht mehr notwendig.

Wenn ein Compiler einen solchen Fall erkennt und dann die Auswertung des Gesamtausdrucks abbricht, bezeichnet man dies als **short-circuit evaluation** (Kurzschlussverfahren) im Unterschied zu einer „complete evaluation“ (vollständige Auswertung). Nach dem C++-Standard werden boolesche Ausdrücke immer mit *short-circuit evaluation* ausgewertet. Deshalb führt der Ausdruck

```
(i%k == 0) && (k>0)
```

mit  $k == 0$  zu einem Laufzeitfehler (Division durch 0), während der logisch gleichwertige Ausdruck

```
(k>0) && (i%k == 0)
```

nicht zu einer Division durch Null führt. Obwohl die beiden Ausdrücke dasselbe Ergebnis haben, werden sie unterschiedlich ausgewertet. Deshalb kann man boolesche Ausdrücke so



aufbauen, dass „Schutzbedingungen“ links von den geschützten Bedingungen stehen. So kann man eine extra Prüfung sparen wie in

```
if (k>0)
    if (i%k == 0)
```

### Aufgaben 2.3.8

1. *c* soll eine Variable des Datentyps *char* sein. Weisen Sie einer booleschen Variablen
  - a) *Grossbuchstabe* genau dann den Wert *true* zu, wenn *c* ein Großbuchstabe ist.
  - b) *Buchstabe* genau dann den Wert *true* zu, wenn *c* ein Buchstabe ist.
  - c) *alphanumerisch* genau dann den Wert *true* zu, wenn *c* ein Buchstabe oder eine Ziffer ist.

#### 2. Schaltjahre

Die Umlaufzeit der Erde um die Sonne bezeichnet man als ein Jahr. Ein Tag ist der Zeitraum, in dem sich die Erde einmal um ihre Achse dreht (Abstand zwischen zwei Mittagen).

Misst man ein Jahr als den Zeitraum zwischen den sogenannten Frühlingspunkten, an denen ein Tag und eine Nacht genau gleich lang sind, war am 1.1.1900 ein Jahr 365 Tage, 5 Stunden, 48 Minuten und 46,0 Sekunden oder 365,24220 Tage lang. Dass ein Jahr in einem Jahrtausend 5,6 Sekunden kürzer wird, soll im Folgenden nicht berücksichtigt werden.

Der von Julius Cäsar 46 v. Chr. festgelegte **Julianische Kalender** ging von durchschnittlich 365,25 Tagen pro Jahr aus. Dieser Fehler ist bis in das 16. Jahrhundert auf ca. 10 Tage angewachsen.

Papst Gregor XIII. hat im Jahr 1582 den auch heute noch gültigen **Gregorianischen Kalender** eingeführt, nach dem ein Jahr durchschnittlich 365,2425 Tage lang ist. Dabei wurden die Nachkommastellen folgendermaßen durch Schaltjahre berücksichtigt: Jede durch 4 teilbare Jahreszahl ist ein Schaltjahr, außer den durch 100 teilbaren, wenn diese nicht durch 400 teilbar sind. Bei diesem Verfahren summiert sich der Fehler in 3300 Jahren auf einen Tag auf.

Weisen Sie einer booleschen Variablen *Schaltjahr* den Wert eines booleschen Ausdrucks zu, so dass *Schaltjahr* den Wert *true* erhält, wenn die Variable *Jahr* (Datentyp *int*) nach dem Gregorianischen Kalender ein Schaltjahr ist, und andernfalls den Wert *false*.

3. Die Ganzzahlvariablen *t1*, *m1* und *j1* sowie *t2*, *m2* und *j2* sollen zwei Kalenderdaten bezeichnen (z.B. *t1*=17, *m1*=12, *j1*=2017). Eine boolesche Variable *vorher* soll den Wert *true* erhalten, wenn das Datum (*t1*, *m1*, *j1*) zeitlich vor dem Datum (*t2*, *m2*, *j2*) liegt, und andernfalls den Wert *false*.
4. Die logischen Operatoren sehen ähnlich aus wie die bitweisen und werden deshalb leicht verwechselt, so dass z.B. *x&y* anstelle von *x&& y* geschrieben wird. Wie unterscheiden sich die Werte dieser Ausdrücke für Operanden des Datentyps *bool* und *int*?

5. Bei einem Lösungsversuch habe ich einmal den folgenden Ausdruck gesehen (dabei war *x* eine *int*-Variable):

```
if (x==!0) ... // gemeint war if (x!=0) ...
```

Wird dieser Ausdruck vom Compiler akzeptiert? Falls ja, was bedeutet er?

## 2.4 Kontrollstrukturen und Funktionen

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Kontrollstrukturen vorgestellt, mit denen man Anweisungen wiederholen und in Abhängigkeit von Bedingungen ausführen kann. Eine ausführliche Behandlung von Funktionen folgt in Kapitel 7.

### 2.4.1 Die *if*- und die Verbundanweisung

Mit einer ***if*-Anweisung** kann man in Abhängigkeit von einer Bedingung steuern, ob eine Anweisung ausgeführt wird oder nicht:

```
if constexpr( init-statementopt condition ) statement
if constexpr( init-statementopt condition ) statement else statement
```

Die beiden optionalen Ausdrücke stehen erst seit C++17 zur Verfügung und werden in Abschnitt 2.4.9 und 2.4.13 beschrieben. Hier werden zunächst nur die schon früher verfügbaren Möglichkeiten behandelt:

```
if ( condition ) statement
if ( condition ) statement else statement
```

Der **Ausdruck** *condition* wird oft durch den Vergleich von zwei Ausdrücken mit einem der Operatoren `==`, `!=`, `<`, `<=`, `>`, `>=` gebildet und stellt umgangssprachlich eine Bedingung dar. Die Anweisung nach (*condition*) wird auch als ***then-Zweig*** bezeichnet und die Anweisung nach *else* (sofern vorhanden) als ***else-Zweig***.

In der ersten Form (ohne *else*) wird die Anweisung nur dann ausgeführt, wenn *condition* den Wert *true* hat. In der zweiten Form (mit *else*) wird erste Anweisung ausgeführt, falls die Bedingung erfüllt ist, und andernfalls die zweite. Die *if*-Anweisung ohne *else* kann als Spezialfall einer *if-else*-Anweisung aufgefasst werden, bei der im *else*-Zweig keine Anweisung steht.

Beispiel: Durch

```
if (x < 1) a = 1;
else a = 2;
```

wird die Anweisung „a = 1“ ausgeführt, wenn die Bedingung `x < 1` erfüllt ist, und andernfalls die Anweisung „a = 2“.

Verwendet man als Bedingung eine boolesche Variable, muss diese nicht auf Gleichheit mit dem Wert *true* geprüft werden:

```
if (Schaltjahr) MaxTag = 29; //siehe Aufgabe 2.3.7,2.
else MaxTag = 28;
```

Da bei einer *if*-Anweisung ohne *else*-Zweig keine Anweisung ausgeführt wird, wenn die zugehörige Bedingung nicht erfüllt ist, haben die nächsten Anweisungen denselben Effekt wie die letzte:

```
MaxTag = 28;
if (Schaltjahr) MaxTag = 29;
```

Mit dem Operator „==“ prüft man die Gleichheit der beiden Operanden und mit „!=“ deren Ungleichheit. Dabei muss man darauf achten, dass man den Operator „==“ nicht mit dem Zuweisungsoperator „=“ verwechselt. Eine solche Verwechslung wird vom Compiler nicht als Fehler bemängelt, sondern lediglich mit der Warnung „Zuweisung in bedingtem Ausdruck“ honoriert, wenn das Level für Warnungen auf Stufe 4 eingestellt ist.

Beispiel: Bei einer Codeanalyse mit den C++ Core Guidelines (siehe Abschnitt 2.13) erhält man eine Warnung, wenn man in der Bedingung einer *if*-Anweisung „=“ und „==“ verwechselt:

```
bool GleichheitsoperatorVerwenden(int x, int y)
{ // warning C6282 : Falscher Operator : Zuweisung einer
  if (x = y)           // Konstanten im Boolean - Kontext.
    return true;      // Verwenden Sie stattdessen "==".
}
```

Die *condition* in einer *if*-Anweisung kann außerdem ein Ausdruck eines Datentyps sein, der in *bool* konvertiert werden kann, oder eine Definition, die mit einer Initialisierung verbunden ist:

```
condition:
    expression
    type-specifier-seq declarator = assignment-expression
```

Der Wert von *condition* ist dann der in den Datentyp *bool* konvertierte Wert des Ausdrucks bzw. des Zuweisungsausdrucks.

Sollen mehrere Anweisungen in Abhängigkeit von einer Bedingung ausgeführt werden, müssen sie durch eine **Verbundanweisung** mit { und } zusammengefasst werden. Eine Verbundanweisung wird auch als **Block** bezeichnet. In ihr können auch Variable definiert werden, die dann in diesem Block **lokal** sind.

```
compound-statement:
    { statement-seq opt }
```

Beispiel: `if (n > 0)`

```

{
    double Mittelwert = Summe / n;
    cout<<"Mittelwert="<< Mittelwert<<endl;
}
else
    cout<<"Fehler, n="<< n<<endl;

```

In einem verschachtelten Block kann man eine Variable mit demselben Namen wie in einem umgebenden Block definieren. Das ist dann eine andere Variable. Da das aber leicht zu Verwechslungen führt, sollte man verdeckte Variablen vermeiden.

Beispiel: Der Compiler weist mit einer Warnung auf verdeckte Variablen hin:

```

int x;
{
    // warning C6246: Die lokale Deklaration von "x"
    int x; // blendet die Deklaration von x im
}          // äußeren Bereich aus.

```

Verwendet man in einer *if*-Anweisung wieder eine *if*-Anweisung, erhält man eine **verschachtelte if**-Anweisung.

- Bei einer *if*-Anweisung im *then*-Zweig

```
if (b1) if (b2) s;
```

wird die Anweisung *s* genau dann ausgeführt, wenn *b1* und *b2* den Wert *true* haben. Wenn der *then*-Zweig einer *if*-Anweisung eine *if-else*-Anweisung ist, lässt sich aus den bisherigen Ausführungen nicht ableiten, ob sich der *else*-Zweig in

```
if (b1) if (b2) S1; else S2;
```

auf *b1* oder *b2* bezieht. Diese Zweideutigkeit ist generell so geregelt, dass ein *else*-Zweig immer zu der letzten Bedingung ohne *else*-Zweig gehört. Deshalb ist die letzte Anweisung gleichwertig mit

```

if (b1)
{
    if (b2) S1;
    else S2;
}

```

- Mit einer *if*-Anweisung in einem *else*-Zweig ist eine **Mehrfachauswahl** möglich:

```

if (x < 0)
{
    a = -1;
    ..
}
else if (x > 0) a = 1;
else a = 0;

```

Bei einer Mehrfachauswahl ist es oft empfehlenswert, im letzten Zweig keine *if*-Anweisung zu verwenden. Bei der rechten *if*-Anweisung

```
if (x<0) // gleichwertig zum letzten Beispiel, aber
...    // nicht empfehlenswert
else if (x>0) ...;
else if
```

### Aufgaben 2.4.1

1. Welche der folgenden *if*-Anweisungen sind nach den Definitionen

```
int x, Punkte, i, j;
bool b;
```

syntaktisch und inhaltlich korrekt?

- a) `if (x = 17) cout << "Volltreffer" << endl;`
  - b) `if (i >= 1 && i <= 10) cout << "Volltreffer" << endl;`
  - c) `if b && (i = j*x) cout << "Volltreffer" << endl;`
  - d) `if (Punkte >= 0) cout << "Extremes Pech" << endl;`  
`else if (Punkte >= 20) cout << "Ziemliches Pech" << endl;`  
`else if (Punkte >= 40) cout << "Ein wenig Glück gehabt" << endl;`
2. In Abhängigkeit vom Wert einer Variablen *Bewegungsart* (Datentyp *char*, zulässige Werte '+' oder '-') soll der Wert der Variablen *Betrag* zur Variablen *Kontostand* addiert oder von dieser subtrahiert werden.
  3. In Abhängigkeit vom Wert der beiden Variablen *Lagergruppe* und *Materialgruppe* (beide Datentyp *char*) sollen gemäß der folgenden Tabelle die Werte der Variablen *LA\_Summe*, *LB\_Summe* usw. um den Wert der Variablen *Summe* erhöht werden:

| Lagergruppe | Materialgruppe | Verarbeitung                                                |
|-------------|----------------|-------------------------------------------------------------|
| 'A'         | 'A'            | <i>LA_Summe</i> und <i>MA_Summe</i> um <i>Summe</i> erhöhen |
| 'A'         | 'B'            | <i>LA_Summe</i> und <i>MB_Summe</i> um <i>Summe</i> erhöhen |
| 'A'         | 'X'            | <i>LA_Summe</i> und <i>MX_Summe</i> um <i>Summe</i> erhöhen |
| 'B'         | 'B'            | <i>LB_Summe</i> und <i>MB_Summe</i> um <i>Summe</i> erhöhen |
| 'B'         | 'D'            | <i>LB_Summe</i> und <i>MD_Summe</i> um <i>Summe</i> erhöhen |

Falls *Lagergruppe* den Wert 'A' hat, aber *Materialgruppe* nicht einen der Werte 'A', 'B' oder 'X', soll die Meldung

„Unzulässige Materialgruppe in Lager A“

ausgegeben werden; entsprechend für *Lagergruppe* = 'B'.

Falls *Lagergruppe* weder den Wert 'A' noch den Wert 'B' hat, soll die Meldung

„Unzulässige Lagergruppe“

erfolgen. In jedem dieser unzulässigen Fälle soll keine Summation durchgeführt werden.

#### 4. Datumsvergleich

Die Ganzzahlvariablen  $t1$ ,  $m1$  und  $j1$  sowie  $t2$ ,  $m2$  und  $j2$  sollen zwei Kalenderdaten bezeichnen (z.B.  $t1=17$ ,  $m1=5$ ,  $j1=2017$ ). Eine boolesche Variable *vorher* soll den Wert *true* erhalten, wenn das Datum ( $t1$ ,  $m1$ ,  $j1$ ) zeitlich vor dem Datum ( $t2$ ,  $m2$ ,  $j2$ ) liegt, und andernfalls den Wert *false*.

Diese Aufgabe wurde schon in Aufgabe 2.3.7, 3. allein mit booleschen Variablen behandelt. Sie kann aber auch mit *if*-Anweisungen bearbeitet werden, was oft als einfacher angesehen wird.

Falls die Jahreszahlen in  $j1$  und  $j2$  verschieden sind, gibt der boolesche Ausdruck

$j1 < j2$

an, ob das erste Datum zeitlich vor dem zweiten liegt:

`if (j1 != j2) vorher = (j1 < j2)`

Wenn dagegen die Jahreszahlen gleich und die Monate verschieden sind, entscheiden die Monate über die zeitliche Anordnung der beiden Kalenderdaten. Sind sowohl die Jahre als auch die Monate gleich, entscheidet der Tag.

Wie muss die Lösung geändert werden, wenn eine boolesche Variable *vorher\_oder\_gleich* genau dann den Wert *true* erhalten soll, wenn das erste Datum vor dem zweiten liegt oder gleich dem zweiten ist?

#### 2.4.2 Die *for*-, die *while*- und die *do*-Schleife

Wiederholungsanweisungen gehören wie die Auswahlanweisungen zu den Kontrollstrukturen. Während man mit einer Auswahlanweisung steuern kann, **ob** eine bestimmte Anweisung (oft eine Verbundanweisung) ausgeführt werden soll oder nicht, steuert man mit einer Wiederholungsanweisung, **wie oft** eine bestimmte Anweisung ausgeführt werden soll.

Wiederholungsanweisungen werden auch als **Schleifen** bezeichnet. Dieser Ausdruck kommt aus der Steinzeit der Programmierung, als den Rechnern die Programme noch mit Lochstreifen eingegeben wurden: Um Anweisungen wiederholt auszuführen, wurde der Lochstreifen zu einer Schleife zusammengeklebt.

In C++ gibt es die folgenden drei Wiederholungsanweisungen:

*iteration-statement:*

```
while ( condition ) statement
do statement while ( expression ) ;
for ( for-init-statement condition opt ; expression opt ) statement
```

Die Bedingung, die die Ausführung einer Schleife kontrolliert, wird auch als **Schleifenbedingung** bezeichnet. Die Anweisung heißt auch **Schleifenkörper**.

In diesem Abschnitt werden die *for*- und die *while*-Anweisung vorgestellt.

Bei der Ausführung der **for-Anweisung** wird zuerst das *for-init-statement* ein einziges Mal ausgeführt. Dann wird geprüft, ob die Bedingung *condition* erfüllt ist (also den Wert *true* hat): Solange dies zutrifft, wird die Anweisung *statement* ausgeführt und der Ausdruck *expression* ausgewertet (in dieser Reihenfolge). Sobald die Bedingung nicht mehr erfüllt ist, wird die *for*-Anweisung beendet.

Zunächst sollen nur solche *for*-Anweisungen betrachtet werden, bei denen

*for-init-statement* eine Zuweisung wie  $i=1$  oder  $i=10$  ist, die eine Laufvariable eines Ganzzahltyps initialisiert. Die Laufvariable kann im *for-init-statement* definiert werden: Dann ist sie nur in der *for*-Anweisung verfügbar.

*condition* eine Bedingung darstellt, in der der Wert der Laufvariablen mit einem Grenzwert verglichen wird, wie z.B.  $i < 10$  oder  $i \geq 1$

*expression* den Wert der Laufvariablen inkrementiert oder dekrementiert, wie z.B.  $i++$ ,  $i=i+2$ ,  $i--$ ,  $i=i-3$

Beispiele: Die Kommentare beziehen sich auf die Ausführung des Schleifenkörpers:

```
int s = 0;
for (int i = 1; i < 1; i++) s = s + i; // wird nie ausgeführt
for (int i = 1; i <= 1; i++) s = s + i; // wird mit i=1 ausgeführt
for (int i = 2; i > 0; i--) s = s + i; // wird mit i=2 und i=1 ausgeführt
```

Dekrementiert man in *expression* den Wert der Laufvariablen, kann man eine Folge von Werten von oben nach unten durchlaufen:

```
int s = 0;
for (int i = 10; i >= 0; i--)
{
    s = s + i;
    cout << "s=" << s << endl;
};
```

Nach *for(...)* darf normalerweise kein Semikolon stehen: Setzt man es trotzdem, stellt es die sogenannte „leere Anweisung“ dar, die denselben Effekt wie keine Anweisung hat. Durch die *for*-Schleife wird dann diese leere Anweisung wiederholt, und die darauffolgende Anweisung wird nur einmal ausgeführt:

```
s = 0;
for (i = 1; i < 10; i++); // <-- ; meist ein Fehler
{
    // die for-Anweisung wird mit i=10 beendet
    s = s + i;
    cout << "s=" << s << endl;
}; //cout wird einmal mit s=10 ausgeführt
```

In einer *for*-Schleife sind das *for-init-statement*, *condition* und *expression* optional und können ausgelassen werden:

```
for ( for-init-statement condition opt ; expression opt ) statement
```

Die Semikolons sind aber immer notwendig. Lässt man das *for-init-statement* oder *expression* aus, muss die Initialisierung der Laufvariablen vor der Schleife bzw. ihre Erhöhung in der Schleife durchgeführt werden. Fehlt *condition*, wird angenommen, dass dieser Ausdruck *true* ist. Die Schleife ist dann eine Endlosschleife, falls sie nicht durch eine Sprunganweisung (siehe Abschnitt 2.4.14) verlassen wird. Diese Formen der *for*-Schleife sind aber eher unüblich.

Beispiel: Die folgenden Anweisungen sind syntaktisch korrekte Endlosschleifen:

1. `for (int i = 0; true; i++) { S; } // S eine Anweisung`
2. `for (int i = 0; ; i++) { S; }`
3. `int i = 0; // initialisiere i vor der Schleife`  
`for (;;) { S; }`
4. `int i = 0;`  
`for (;;) { S; i++; } // erhöhe i in der Schleife`

Die **while-Schleife** ist wie die *for*-Schleife eine Wiederholungsanweisung:

```
while ( condition ) statement
```

Bei der Ausführung einer *while*-Schleife wird zunächst die Bedingung *condition* geprüft. Wenn sie den Wert *true* hat, wird anschließend die Anweisung *statement* ausgeführt und danach erneut *condition* geprüft. Diese Abfolge wird so lange wiederholt, bis *condition* den Wert *false* hat. Falls die Bedingung bei der ersten Ausführung des Schleifenkörpers nicht erfüllt ist, wird der Schleifenkörper nie ausgeführt.

Beispiele: Die folgenden Schleifen geben beide die Zahlen 1 bis *n* aus, falls *n* größer oder gleich 1 ist. Falls *n* kleiner als 1 ist, werden keine Werte ausgegeben.

```
int i = 0;
while (i < n) // Datentyp von n: int
{
    i++;
    cout << i << endl;
}

int i = 1;
while (i <= n)
{
    cout << i << endl;
    i++;
}
```

Bei der ersten Schleife wird *i* mit einem Wert initialisiert, der um 1 geringer ist als der Wert, mit dem der Schleifenkörper erstmals ausgeführt wird. Nach dem



Verlassen der Schleife ist der Wert von  $i$  gleich dem Wert, mit dem die Verarbeitungsanweisung zuletzt ausgeführt wurde. Bei der zweiten Schleife wird  $i$  mit dem Wert initialisiert, mit dem die Verarbeitung erstmals ausgeführt werden soll. Nach dem Verlassen der Schleife ist der Wert von  $i$  um 1 höher als der, mit dem der Schleifenkörper zuletzt ausgeführt wurde.

Beim Entwurf einer Schleife muss man stets darauf zu achten, dass sie nach einer endlichen Anzahl von Wiederholungen auch wieder verlassen wird. Wenn beispielsweise vor der Ausführung von

```
while (i != n)
    i++;    // i und n: ein Ganzzahldatentyp
    ...    // keine weiteren Veränderungen von i und n
```

$i = 5$  und  $n = 0$  gilt, wird die Abbruchbedingung  $i = 0$  nie eintreten und deshalb die Schleife auch nie verlassen, da  $i$  in der Schleife immer weiter erhöht wird. Eine solche Schleife wird deshalb als **Endlosschleife** bezeichnet.

Genau genommen wird diese Endlosschleife aber doch nicht endlos durchlaufen: Da  $i$  einen Ganzzahldatentyp hat, wird  $i$  so lange erhöht, bis es den maximal darstellbaren positiven Wert erreicht hat. Danach bewirkt eine weitere Addition von 1 einen negativen Wert von  $i$ , über den man dann doch wieder bei  $n$  ankommt. Trotzdem ist das meist ziemlich sicher nicht das, was man eigentlich wollte, und es dauert auch fast endlos.

Bei den früher üblichen DOS-Programmen konnte eine Endlosschleife das ganze System blockieren. Diese Gefahr besteht bei einem Programm, das unter der Entwicklungsumgebung Visual Studio läuft, nicht, da man es kann jederzeit mit *Debuggen|Debuggen beenden* (Umschalt+F5) abbrechen kann. Es ist nicht notwendig, Visual Studio mit dem Windows Task-Manager abzubrechen.

### Die *do*-Anweisung

```
do statement while ( expression ) ;
```

ist eine weitere Wiederholungsanweisung. Hier ist *expression* ein Ausdruck ist, der in den Datentyp *bool* konvertiert werden kann. Dieser Ausdruck ist die **Schleifenbedingung**, und die Anweisungen zwischen *do* und *while* sind der **Schleifenkörper**.

Bei der Ausführung einer *do*-Anweisung wird zunächst der Schleifenkörper ausgeführt. Dann wird die Schleifenbedingung ausgewertet. Ergibt sich dabei der Wert *false*, wird die *do*-Anweisung verlassen. Andernfalls werden diese Schritte wiederholt, bis die Schleifenbedingung den Wert *false* hat.

Beispiel: Die mit einer *while*-Anweisung erzielte Ausführung kann auch mit einer *do*- und einer *if*-Anweisung erreicht werden (linke Spalte), und die einer *do*-Anweisung mit einer *while*-Schleife (rechte Spalte):

```
while (b) S;           do S;
                       while (b); ;
```

```

if (b)                S;
do S;                while (b) S;
while (b);

```

Offensichtlich wäre bereits eine der beiden Wiederholungsanweisungen ausreichend. Die zweite Formulierung ist jedoch umständlicher, da die Bedingung *b* oder die Anweisung *S* zweimal aufgeführt werden müssen.

Im Allgemeinen sollte man eine *while*-Schleife gegenüber einer *do*-Schleife bevorzugen. Sie hat den Vorteil, dass man bei der Ausführung von *S* immer die Bedingung *b* voraussetzen kann. Typische Anwendungen von *do*-Schleifen sind Menüs in einem Konsolenprogramm.

Beispiel: `do {`

```

    cout << "Bitte wählen Sie:" << endl;
    cout << "Fibonacci(50) berechnen (1)" << endl;
    cout << "Fakultaet(10) berechnen (2)" << endl;
    cout << "Programmende (q)" << endl;
    char c;
    cin >> c;
    if (c == '1') cout << "Fib(50)=" << Fibo(50) << endl;
    else if (c == '2') cout << "Fact(10)=" << Fact(10) << endl;
} while (c != 'q');
```

### 2.4.3 Funktionen und der Datentyp *void*

Eine **Funktion** wird im einfachsten Fall nach dem folgenden Schema definiert:

*T F (parameter-declaration-list ) compound-statement*

Hier steht *T* für den Datentyp des Funktionswertes (der auch als Rückgabetyt bezeichnet wird), *F* für den Namen der Funktion und *compound-statement* für eine Verbundanweisung. Die Verbundanweisung besteht aus den Anweisungen, die beim Aufruf der Funktion ausgeführt werden und enthält oft eine oder mehrere *return*-Anweisungen:

*return expression opt ;*

Durch die *return*-Anweisung wird die Funktion verlassen. Gibt man nach *return* noch einen Ausdruck an, ist sein Wert der **Funktionswert (Rückgabewert)**. Ohne ein *return* in der Verbundanweisung wird die Funktion nach der letzten Anweisung verlassen. Danach wird die nächste Anweisung nach dem Aufruf der Funktion ausgeführt.

Eine Funktion darf nicht im Anweisungsteil einer anderen Funktion definiert werden. Anfänger schreiben manchmal eine Funktion in die Funktion *main* und wundern sich dann, wenn sich der Compiler weigert, das zu übersetzen:

```
int main()
```

```

{
    int f()
    { //error: Lokale Funktionsdefinitionen sind unzulässig
    }
}

```

In einer Parameterdeklaration kann man einen oder mehrere Parameter einschließlich ihres Datentyps angeben. Falls der Datentyp des Parameters kein Referenztyp (siehe Abschnitte 2.4.5 und 7.4) ist, bezeichnet man ihn auch als **Wertparameter**. Ein Wertparameter ist eine lokale Variable in der Funktion, die beim Aufruf der Funktion mit dem entsprechenden Argument initialisiert wird. .

Eine Funktion wird dann dadurch aufgerufen, dass man ihren Namen angibt und in runden Klammern für jeden Parameter ein Argument. Falls die Funktion ohne Parameter definiert wurde, gibt man nur ein Klammerpaar ohne Argumente an. Durch den Funktionsaufruf wird jeder Parameter mit dem entsprechenden Argument initialisiert und dann die Verbundanweisung aus der Funktionsdefinition ausgeführt. Der Funktionswert ist dann ein Ausdruck des Datentyps, der bei der Definition der Funktion als Rückgabetyt angegeben wurde.

Beispiel: Durch

```

int Quadratsumme(int a, int b)
{
    int s = 0;
    for (int i = a; i <= b; i++)
        s = s + i*i;
    return s;
}

```

wird eine Funktion definiert, deren Funktionswert die Summe der Quadratzahlen von a bis b ist. Diese Funktion kann dann wie in den nächsten Anweisungen aufgerufen werden. Dabei wird die Summe der ersten 5 Quadratzahlen ( $1^2+2^2+3^2+4^2+5^2=55$ ) ausgegeben:

```

int qs = Quadratsumme(1, 5); // Funktionsaufruf
cout << qs << endl;

```

Beim Aufruf einer Funktion mit einem Parameter eines elementaren Datentyps wird ein Argument durch eine Standardkonversion in den Datentyp des Parameters konvertiert. Eine solche Standardkonversion wird auch mit dem Ausdruck nach *return* in den Datentyp des Rückgabewerts durchgeführt. Falls man unterbinden will, dass dabei Informationen verloren gehen (siehe Abschnitt 2.3.4) unterbinden möchte, sollte man das Argument und den Ausdruck nach *return* in einer Initialisierungsliste übergeben.

Beispiel: Die *return*-Anweisung in f wird vom Compiler zurückgewiesen:

```
int f(unsigned int x)
{
    return{ x }; // Fehler: einschränkende Konvertierung
                // zu "int"
}
```

Der Aufruf mit Initialisierungslisten sieht etwas umständlich aus:

```
int qs0 = Quadratsumme({ 1 }, { 5 });
```

Er verhindert aber Standardkonversionen, die zu Fehlern führen können:

```
unsigned int u = 5;
int qs2 = Quadratsumme(1.0 , u); // wird kompiliert,
                                Standardkonversion
int qs3 = Quadratsumme({ 1.0 }, { u }); // Fehler:
                                        Konvertierung
```

Wenn man durch eine Funktion nur eine Anweisungsfolge unter einem Namen zusammenfassen und keinen Wert zurückgeben will, kann man das mit dem Datentyp **void** als Rückgabetyt explizit zum Ausdruck bringen. Dieser Datentyp ist gerade dadurch charakterisiert, dass er keine Werte darstellen kann. Es ist insbesondere nicht möglich, eine Variable des Datentyps *void* zu definieren oder einen Ausdruck dieses Datentyps (z.B. auf der rechten Seite einer Zuweisung) zu verwenden:

```
void x; // error: Unzulässige Verwendung des Typs 'void'
```

Beispiel: Durch den Rückgabetyt *void* wird explizit zum Ausdruck gebracht, dass die Funktion

```
void zeigeQuadratsummen(int v, int b)
{
    for (int i = v; i <= b; i++)
        cout<<"v="<<v<<".i="<<i<<": "<<Quadratsumme(v, i)<<endl;
}
```

lediglich aufgerufen werden kann und dass sie keinen Wert zurückgibt:

```
zeigeQuadratsummen(1, 10);
```

Es ist nicht möglich, sie auf der rechten Seite einer Zuweisung oder in einem Ausdruck zu verwenden:

```
x = zeigeQuadratsummen(1, 10); //Fehler: Kein zulässiger Typ
```

Jede Funktion mit einem anderen Rückgabetyt als *void* sollte für jedes Argument einen Wert zurückgeben, da der Funktionswert sonst unbestimmt ist.

Beispiel: Der Funktionswert der Funktion `f` ist für das Argument 0 unbestimmt:

```
int f(int x)
{
    if (x>0) return x;
    else if (x<0) return -x; //besser: else return -x;
} // warning: Nicht alle Steuerelementpfade geben
//          einen Wert zurück
```

Die Umsetzung dieser Anforderung ist aber nicht immer einfach. Bei manchen Funktionen ist der Wertebereich der Parameter größer als der der zulässigen Argumente. Dann muss man auch für unzulässige Argumente einen Wert zurückgeben (am besten einen, der auf den Fehler hinweist), oder eine Exception (siehe Abschnitt 2.9) auslösen.

Beispiel: Wenn ein Wochentag durch einen *int*-Wert im Bereich 1 (Montag) bis 7 kodiert wird, dann gibt es keinen *int*-Datentyp, der nur diese Werte und keine anderen darstellen kann. In einer Funktion für solche Argumente muss man dann auch für unzulässige Argumente wie 17 einen Wert zurückgeben.

```
bool Wochenende(int d)
{
    if ((d>0) && (d<6))
        return false;
    else if ((d == 6) || (d == 7)) return true;
    else return false;
}
```

Ohne den letzten *else*-Zweig erhält man eine Warnung oder Fehlermeldung “Nicht alle Steuerelementpfade geben einen Wert zurück”.

Der Rückgabewert der *main*-Funktion wird an das Betriebssystem übergeben. Ein von 0 verschiedener Wert bedeutet einen Fehler. Die Anweisung „**return 0**“ in der *main*-Funktion ist in C++ und C überflüssig, da *main* bei einem fehlenden *return* den Wert 0 zurückgibt.

In C++ kann man **Funktionen überladen**, d.h. verschiedene Funktionen mit demselben Namen definieren. Diese Funktionen müssen dann Parameter mit unterschiedlichen Datentypen haben. Beim Aufruf einer solchen Funktion entscheidet der Compiler dann anhand des Datentyps der Argumente, welche Funktion er aufruft. Die Regeln, nach denen der Compiler die aufgerufene Funktion auswählt, werden in Abschnitt 7.3 noch genauer beschrieben. Die einfachste Regel ist die, dass die Funktion mit derselben Anzahl und demselben Datentyp der Argumente aufgerufen wird.

Beispiel: Nach der Definition der überladenen Funktionen

```
int abs(int x)                long abs(long x)
{
    if (x>0) return x;        {
    else return -x;            if (x>0) return x;
}                             else return -x;
}                             }
```

werden durch die folgenden Aufrufe die als Kommentar angegebenen Funktionen aufgerufen:

```
abs(17); // abs(int)
abs(17L); // abs(long)
```

#### 2.4.4 Eine kleine Anleitung zum Erarbeiten der Lösungen

Nicht nur Anfängern fällt es oft schwer, zu einer Programmieraufgabe eine Lösung zu finden. Deswegen jetzt einige Tipps, die bei vielen Aufgaben dazu beitragen können, eine Lösung zu finden.

1. Zuerst muss man die **Aufgabe verstehen**. Wenn man eine Aufgabe nicht verstanden hat, kann man auch nicht erwarten, eine Lösung zu finden.  
Das Verständnis für eine Aufgabe wird oft dadurch erleichtert, dass man einige typische **Ausgangswerte** und die zugehörigen **Ergebnisse** auf ein Blatt Papier schreibt. Bei einfachen Aufgaben ist das oft nur eine Tabelle mit Werten. Bei komplexeren Aufgaben spricht man auch von Anwendungsfällen (engl. „use cases“), deren Beschreibung umfangreich sein kann.
2. Oft sieht man in einer solchen Tabelle Werte, für die die Lösung einfach ist. Dann sucht man zunächst für diese einfachen Fälle nach **Anweisungen in der Programmiersprache**, die die Ergebnisse aus den Ausgangswerten bestimmen. Nachdem man einige einfache Fälle gelöst hat, versucht man, diese Anweisungen auf schwierigere Fälle zu übertragen.
3. Diese Anweisungen für die verschiedenen Einzelfälle aus 2. versucht man so zusammenzufassen, dass eine gemeinsame Anweisungsfolge alle diese Einzelfälle abdeckt. Falls man kein Schema findet, sind in 1. eventuell weitere Fälle notwendig.
4. Die Anweisungen aus 3. versucht man dann in einer oder mehreren **Funktionen** zusammenzufassen, bei der die Parameter den Ausgangswerten und das Ergebnis dem Rückgabewert oder einem Referenzparameter entsprechen.

#### Aufgaben 2.4.4

Schreiben Sie die Lösungsfunktionen in eine wie in Abschnitt 1.2.5 beschriebene Header-Datei (z.B. mit dem Namen „Loesungen-Kap-2.h“) und rufen Sie diese auf.

1. Schreiben Sie eine Funktion *plus1*, die für einen als Parameter übergebenen *int*-Wert den um 1 höheren Wert zurückgibt (z.B. *plus1*(17)=18, *plus1*(0)=1).

Die folgenden Teilaufgaben zeigen einige Varianten, wie man die Ergebnisse einer Funktion anzeigen kann. Sie können sich bei den folgenden Aufgaben meist für eine dieser Varianten entscheiden.

- a) Rufen Sie *plus1* in der *main*-Funktion auf. Lesen Sie dazu mit *cin* eine Zahl ein, die der Benutzer eingeben soll. Von dieser Zahl soll dann mit *plus1* der um 1 höhere Wert berechnet und mit *cout* ausgegeben werden.

- b) Damit Sie in der *main*-Funktion einfach vom Aufruf einer der folgenden Lösungen zum Aufruf einer anderen Lösung wechseln können, können Sie *plus1* auch in eine eigene Funktion (z.B. mit dem Namen *plus1\_im\_Dialog\_aufrufen*) aufnehmen und diese Funktion dann in der *main*-Funktion aufrufen.

Da das Einlesen von Benutzereingaben etwas aufwendig ist, können Sie *plus1* sowie die Funktionen aus den folgenden Aufgaben auch mit hartkodierten Werten aufrufen und diese Werte dann ausgeben.

- c) Rufen Sie *plus1* in einer Funktion mit einigen Werten auf, die im Programm einzeln hartkodiert eingegeben werden.
- d) Rufen Sie *plus1* einer Schleife mit aufeinanderfolgenden Werten auf. Die Anfangs- und Endwerte der Schleife können Sie hartkodiert eingeben.

Falls Sie die Lösungen bei den folgenden Aufgaben nicht nach wenigen Minuten finden, gehen Sie wie in Abschnitt 2.4.4 vor.

2. Schreiben Sie eine Funktion *Quersumme*, die für einen als Parameter übergebenen Ganzzahlwert die **Quersumme** als Funktionswert zurückgibt (z.B. *Quersumme*(123)=6, *Quersumme*(1000)=1).

Geben Sie die Funktionswerte von *Quersumme* wie in Aufgabe 1. b), c) oder d) aus.

3. Die **Fibonacci-Zahlen** 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8 usw. sind durch  $f_0 = 0$ ,  $f_1 = 1$ ,  $f_i = f_{i-1} + f_{i-2}$  für  $i = 2, 3, 4, \dots$  definiert, d.h. jede Zahl, außer den ersten beiden, ist die Summe der beiden vorangehenden.

Diese Zahlenfolge geht auf eine Additionsübung des italienischen Mathematikers Fibonacci im Jahr 1202 zurück. Dabei bezeichnet  $f_n$  die Anzahl der Hasenpaare nach  $n$  Monaten, wenn jedes Hasenpaar jeden Monat ein neues Paar Junge bekommt, das nach einem Monat ebenfalls ein Paar Junge bekommt. In diesem einfachen Modell sind alle Hasen unsterblich.

- a) Schreiben Sie eine Funktion, die für einen als Parameter übergebenen Ganzzahlwert  $n$  den  $n$ -ten Wert der Fibonacci-Folge als Funktionswert zurückgibt (z.B. *Fibo*(0)=0, *Fibo*(1)=1, *Fibo*(2)=1).
- b) Schreiben Sie eine Funktion, die die ersten  $n$  Werte der Fibonacci-Folge auf der Konsole ausgibt. Rufen Sie diese Funktion mit  $n=50$  auf.

4. Welche Werte werden durch die *for*-Schleife ausgegeben

```
int n;
cin >> n;
for (unsigned int u = 0; u <= n - 1; u++)
    cout << u << endl;
```

- a) mit  $n=0$ ?
- b) mit  $n=1$ ?
- c) Welche Ausgabe erhält man mit  $n=0$ , wenn man in der *for*-Schleife die Bedingung  $u \leq n-1$  durch  $u < n$  ersetzt?

5. Eine positive ganze Zahl  $n$  ist eine **Primzahl**, wenn sie genau zwei verschiedene Teiler hat (nämlich 1 und  $n$ ) und keine weiteren. Beispielsweise sind 2, 3 und 5 Primzahlen, aber 1, 4 und 6 sind keine.
- Schreiben Sie eine boolesche Funktion *istPrim*, die für einen als Parameter übergebenen Ganzzahlwert  $n$  den Wert *true* zurückgibt, wenn  $n$  eine Primzahl ist, und andernfalls den Wert *false*. Prüfen Sie dazu in einer Schleife alle möglichen Teiler von  $n$ .
  - Schreiben Sie eine Funktion *zeigePrimzahlen*, die für einen als Parameter übergebenen Wert  $n$  alle Primzahlen ausgibt, die  $\leq n$  sind.
  - Nach einer Vermutung des Mathematiker **Goldbach** kann jede gerade ganze Zahl  $>2$  als Summe von zwei Primzahlen dargestellt werden. Obwohl diese Vermutung schon vor über 200 Jahren aufgestellt und für zahlreiche Werte überprüft wurde, konnte sie bis jetzt noch nicht bewiesen werden. Schreiben Sie eine Funktion *zeigeGoldbachPaare*, die für einen als Parameter übergebenen Wert  $n$  alle Paare von Primzahlen mit der Summe  $n$  ausgibt. Die Anzahl dieser Paare ist z.B. 6 für  $n=100$  ( $100 = 3 + 97 = 11 + 89 = 17 + 83 = 29 + 71 = 41 + 59 = 47 + 53$ ) und 28 für  $n=1000$ .
6. Drei Zahlen  $a$ ,  $b$  und  $c$ , für die  $a^2 + b^2 = c^2$  gilt (z.B. 3, 4 und 5), heißen **Pythagoräisches Zahlentripel**. Geben Sie alle solchen Zahlentripel für  $a$  und  $b \leq n$  (ein Parameter) aus. Probieren Sie dazu für alle Kombinationen von  $a$  und  $b$  alle möglichen Werte von  $c$  aus, ob die Bedingung gilt. Für  $n=50$  gibt es 26 solche Tripel.
7. Beim sogenannten  **$3n+1$ -Problem** wird ausgehend von einer positiven ganzen Zahl  $n$  nach dem folgenden Verfahren eine Zahlenfolge bestimmt:

Für  $n=1$  wird das Verfahren abgebrochen.

Falls  $n$  ungerade ist, ersetzt man  $n$  durch  $(3n+1)$ .

Falls  $n$  gerade ist, ersetzt man  $n$  durch  $n/2$ .

So erhält man z.B. für  $n=5$  die Zahlenfolge 5, 16, 8, 4, 2, 1. Nach einer Vermutung der Mathematiker Ulam und Collatz konvergiert diese Folge immer. Obwohl diese Vermutung inzwischen für alle Zahlen  $< 7 \cdot 10^{11}$  überprüft wurde, konnte sie bisher nicht allgemein bewiesen werden.

Schreiben Sie eine Funktion *f3nPlus1*, die für einen als Parameter übergebenen Wert  $n$  die Anzahl der Schritte als Funktionswert zurückgibt, bis das Verfahren abbricht. Zum Testen soll über einen zweiten Parameter gesteuert werden können, ob alle Werte dieser Zahlenfolge ausgegeben werden oder nicht.

## 8. Die Gauß'sche Osterformel

Auf dem Konzil von Nicäa (325 n. Chr.) wurde festgelegt, dass der Ostersonntag der erste Sonntag nach dem ersten Vollmond im Frühling ist. Nach Knuth (1973, Bd. 1) war die Berechnung des Ostersonntags die einzige wichtige Anwendung der Arithmetik im Mittelalter.

Gauß hat die Arbeit der mit dieser Berechnung beschäftigten Mönche durch den folgenden Algorithmus rationalisiert. Die hier dargestellte Version gilt allerdings nur bis zum Jahr 2299. Ein allgemeineres Verfahren findet man bei Knuth.



M und N seien durch die folgende Tabelle gegeben:

| Jahr      | M  | N |
|-----------|----|---|
| 1583–1699 | 22 | 2 |
| 1700–1799 | 23 | 3 |
| 1800–1899 | 23 | 4 |
| 1900–2099 | 24 | 5 |
| 2100–2199 | 24 | 6 |
| 2200–2299 | 25 | 0 |

A, B, C seien die Reste der Divisionen der Jahreszahl durch 19, 4 bzw. 7, D der Rest der Division von  $(19A + M)$  durch 30 und E der Rest der Division von  $(2B + 4C + 6D + N)$  durch 7.

Dann ist der Ostersonntag gleich dem  $(22 + D + E)$ -ten März oder gleich dem  $(D + E - 9)$ -ten April, falls die folgenden Grenzfälle berücksichtigt werden:

1. Ergibt sich der 26. April, so setze man stets den 19. April.
2. Ergibt sich der 25. April und gilt  $D = 28$ ,  $E = 6$  und  $A > 10$ , so fällt der Ostersonntag auf den 18. April.

Der Pfingstsonntag ist dann der siebte Sonntag nach Ostern.

Schreiben Sie ein Programm, das den Oster- und Pfingstsonntag berechnet. Testen Sie das Programm mit den folgenden Werten:

|                        |                     |
|------------------------|---------------------|
| 1970 Ostern: 29. März  | Pfingsten: 17. Mai  |
| 1971 Ostern: 11. April | Pfingsten: 30. Mai  |
| 1972 Ostern: 2. April  | Pfingsten: 21. Mai  |
| 1973 Ostern: 22. April | Pfingsten: 10. Juni |
| 1974 Ostern: 14. April | Pfingsten: 2. Juni  |
| 1975 Ostern: 30. März  | Pfingsten: 18. Mai  |
| 1976 Ostern: 18. April | Pfingsten: 6. Juni  |
| 1977 Ostern: 10. April | Pfingsten: 29. Mai  |
| 1978 Ostern: 26. März  | Pfingsten: 14. Mai  |
| 1979 Ostern: 15. April | Pfingsten: 3. Juni  |
| 1980 Ostern: 6. April  | Pfingsten: 25. Mai  |

Eine schön ausgedruckte Liste mit den so berechneten Osterdaten ist auch gut als Ostergeschenk geeignet (jedes Jahr ein anderes Jahrhundert). Weniger guten Freunden kann man eine Liste mit dem Datum von Weihnachten schenken (auch jedes Jahr ein anderes Jahrhundert).

9. Haben Sie darauf geachtet, dass alle Ihre Funktionen zur Lösung dieser Aufgaben für jedes Argument im Wertebereich der Funktionsparameter einen definierten Wert zurückgeben?

### 2.4.5 Wert- und Referenzparameter

Nach dem Datentyp eines Parameters kann man das Zeichen & angeben. Dadurch wird der Datentyp des Parameters zu einem sogenannten **Referenztyp**. Ein Referenztyp bewirkt, dass die Anweisungen der Funktion beim Aufruf direkt mit den Argumenten ausgeführt werden. Deshalb werden bei einem Aufruf von

```
void vertausche(int& a, int& b)
{
    int h = a;
    a = b;
    b = h;
}
```

die Werte der beiden als Argument übergebenen Variablen vertauscht:

```
int x = 1, y = 2;
vertausche(x, y);
// x=2; y=1
```

Hätte man das Zeichen & in der Funktionsdefinition ausgelassen, wären die Parameter **Wertparameter** (siehe Seite 76). Wertparameter unterscheiden sich von Referenzparametern dadurch, dass sie lokale Variable in der Funktion sind, die beim Aufruf mit den Argumenten initialisiert werden. Dann wären die Werte von x und y nicht vertauscht worden, da alle Anweisungen mit den Parametern in der Funktion mit den lokalen Variablen durchgeführt werden, die zu den Parametern gehören. Die Operationen mit diesen lokalen Variablen wirken sich aber nicht auf die entsprechenden Argumente aus.

Eine ausführlichere Darstellung von Wert- und Referenzparametern folgt in Abschnitt 7.4.

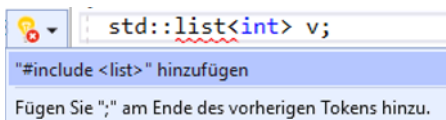
### 2.4.6 Die Verwendung von Bibliotheken und Namensbereichen

Nach dem C++-Standard gehören zahlreiche **Bibliotheken** mit **vordefinierten Funktionen** und Datentypen zu C++. Außerdem gehören zu den meisten Compilern noch weitere Bibliotheken. Alle diese Bibliotheken stehen nach einer *#include*-Anweisung (siehe Abschnitt 2.11.1) zur Verfügung. Eine solche *#include*-Anweisung muss auf der äußersten Programmebene angegeben werden, d.h. außerhalb einer Funktion, Klasse oder eines *namespace*.

Für die C++-**Standardbibliotheken** verwendet man einen Header-Namen ohne „h“ wie z.B.

```
#include <cstdlib>
```

Falls man ein Element der Standardbibliothek verwendet, aber die zugehörige *#include*-Anweisung vergessen hat, bietet Visual Studio an, diese einzufügen:



In Zukunft (C++20) wird die Standardbibliothek auch als Modul verfügbar sein. Das ermöglicht eine einfachere Verwendung als mit `#include`.

```
import <iostream>;
import std.core; // siehe Abschnitt 2.13
```

Die Elemente der C++-Bibliothek sind im Namensbereich (siehe Kapitel 9) `std` enthalten. Um eine Funktion oder Klasse `f` aus einer solchen Bibliothek zu verwenden,

- schreibt man entweder jedes Mal `std::` vor `f` wie in

```
std::f()
```

oder man erspart sich die Notwendigkeit, jedes Mal „`std::`“ zu schreiben

- mit einer ***using-Direktive***

```
#include <cstdlib>
using namespace std;
```

- oder mit einer sogenannten ***using-Deklaration***

```
#include <cstdlib>
using std::f;
```

vor dem ersten Zugriff auf die Bibliotheksfunktion. Eine einzige *using-Direktive* reicht für alle C++-Standardbibliotheken aus. Bei kleinen Projekten (wie z.B. den Übungsaufgaben in diesem Buch) ist eine *using-Direktive* meist am einfachsten. Bei großen Projekten ist die Gefahr von Namenskonflikten aber größer. Dann sollte man eine der beiden anderen Alternativen bevorzugen.

Die meisten **Bibliotheken** des **C-Standards** gehören ebenfalls zu C++. Sie stehen nach einer `#include`-Anweisung mit einem Header-Namen mit der Erweiterung „.h“ zur Verfügung, wie in

```
#include <stdlib.h>
```

Für sie ist keine *using-Direktive* oder –Deklaration notwendig.

Zu den meisten **C-Standardbibliotheken** gibt es **auf C++ angepasste** Versionen, deren Name mit dem Buchstaben „c“ beginnt und von dem Namen der C-Bibliothek ohne die Endung „.h“ gefolgt wird.

Beispiele: Den C-Standardbibliotheken in der linken Spalte entsprechen die C++-Bibliotheken der rechten Spalte:

```
#include <stdlib.h>      #include <cstdlib>
#include <math.h>        #include <cmath>
```

Verschiedene Bibliotheken können ähnliche Namen haben. Mit der ersten der nächsten beiden `#include`-Anweisungen erhält man die Stringklasse der C++-

Standardbibliothek (siehe Abschnitt 3) und mit der zweiten die C-Funktionen für nullterminierte Strings (siehe Abschnitt 6.6):

```
#include <string>    // C++ Stringklasse
#include <string.h>   // nullterminierte Strings
```

Obwohl oft kein Unterschied zwischen einer C-Bibliothek und ihrer C++-Version besteht, gibt es gelegentlich doch kleine Unterschiede. Deswegen wird empfohlen, die **C++-Versionen** zu verwenden.

In den folgenden Beispielen werden diese Bibliotheken zusammen mit einer *using*-Deklaration wie in der linken Spalte verwendet. Die anderen beiden Varianten sind genauso möglich:

```
#include <cmath>      #include <cmath>      #include <math.h>
using namespace std;  using std::sin;        // kein using notw.
```

Die Lösungen einiger Übungsaufgaben, die auch für andere Aufgaben oder Anwendungen hilfreich sein können, sind im Namensbereich *rk1* zusammengefasst.

### 2.4.7 Zufallszahlen

Nach

```
#include <cstdlib>
using namespace std;
```

steht die Funktion

```
int rand();
```

aus der C Standardbibliothek zur Verfügung, die einen Zufallswert im Bereich 0 .. RAND\_MAX (0x7FFFU=32767 bei den meisten Compilern) zurückgibt. Obwohl der Wertebereich dieser Funktion recht klein ist, reicht er für einfache Anwendungen aus.

Die Arbeitsweise eines Zufallszahlengenerators wie *rand* kann man sich folgendermaßen vorstellen:

- Vor dem ersten Aufruf wird eine globale Variable mit 1 initialisiert:

```
int seed=1; // eine globale Variable
```

- Bei jedem Aufruf wird aus dieser globalen Variablen ein neuer Wert berechnet und dieser dann als Funktionswert zurückgegeben. Der Park/Miller Algorithmus liefert wesentlich bessere Zufallswerte als *rand*:

```
int Rand() // Rückgabewert im Bereich 0..
{ // siehe Park/Miller (1988)
    const long long a = 48271; // für 64-bit Multiplikation a*seed
    seed = (a*seed) % 2147483647; // 231-1, Mersenne-Primzahl
```

```
    return seed;
}
```

Falls *seed* vor dem Start des Zufallszahlengenerators nicht auf einen anderen Wert gesetzt wird, erhält man nach jedem Start des Programms immer dieselbe Folge von Zufallszahlen. Da ein solches Verfahren streng determiniert ist und eigentlich nichts Zufälliges hat, wird ein solcher Zufallszahlengenerator auch als **Pseudozufallszahlengenerator** bezeichnet. Dass nach jedem Start dieselbe Folge von Zahlen erzeugt wird, ist oft sogar erwünscht, damit man ein Experiment reproduzieren kann.

Mit der Funktion

```
void srand (unsigned __seed);
```

kann man den Startwert *seed* auf den als Argument übergebenen Wert setzen. Diese Funktion ruft man oft mit einem zeitabhängigen Wert auf wie z.B. mit einem Wert der nach

```
#include <ctime>
```

verfügbaren Funktion *time*, die mit dem Argument 0

```
srand(std::time(0));
```

die Anzahl der Sekunden seit dem 1.1.1970 zurückgibt.

In C++ stehen nach

```
#include <random>
```

zahlreiche Zufallszahlengeneratoren (u.a. auch für nicht gleichverteilte Verteilungen) zur Verfügung. Einer der einfachsten ist *minstd\_rand*, der den Park-Miller Algorithmus von oben implementiert. Die Verwendung von *minstd\_rand* ist auf den ersten Blick etwas ungewöhnlich, da *minstd\_rand* ein Datentyp ist und eine Variable dieses Datentyps wie eine Funktion aufgerufen werden kann. Jeder Aufruf liefert dann eine neue Zufallszahl im Bereich 0 .. 2147483647-1 zurück.

Beispiel: Jeder Aufruf von *rnd* liefert eine neue Zufallszahl:

```
std::minstd_rand rnd;
for (int i = 0; i < 10; i++)
{
    int r = rnd();
    cout << r << endl;
}
```

Den Zufallszahlengenerator kann man bei der Definition mit einem Startwert initialisieren:

```
std::minstd_rand rnd(std::time(0));
```

### Aufgaben 2.4.7

Schreiben Sie die Lösungsfunktionen in eine wie in Abschnitt 1.2.5 beschriebene Header-Datei (z.B. in die schon in Aufgabe 2.4.4 angelegte Header-Datei) und rufen Sie diese auf.

1. Schreiben Sie eine Funktion, die die folgenden Zufallszahlen ausgibt. Vor jeder Gruppe soll ein Text darauf hinweisen, wie die Werte erzeugt wurden:
  - Zuerst 5 mit *rand* erzeugte Zufallszahlen, ohne dass *srand* zuvor gesetzt wurde.
  - Dann 5 mit *rand* erzeugte Zufallszahlen, nachdem *srand* mit *std::time(0)* aufgerufen wurde.
  - Dann 5 mit *minstd\_rand* erzeugte Zufallszahlen, ohne dass der Zufallszahlengenerator mit einem Startwert initialisiert wurde.
  - Dann 5 mit *minstd\_rand* erzeugte Zufallszahlen im Bereich 1 .. 49, nachdem der Zufallszahlengenerator mit *std::time(0)* initialisiert wurde

Vergleichen Sie die Ergebnisse, wenn Sie das Programm mehrfach starten.

### 2.4.8 Default-Argumente

Da ein Funktions-Parameter eine lokale Variable ist, die beim Aufruf mit dem Argument initialisiert wird, muss beim Aufruf einer Funktion jeder Parameter ein Argument haben. Meist gibt man das explizit an. Es gibt aber auch Situationen, bei denen es bequemer ist, das Argument nicht selbst anzugeben, sondern vom Compiler einsetzen zu lassen.

Das ist mit einem **Default-Argument** möglich. Ein Default-Argument ist ein Wert, den man in einer Parameterdeklaration nach einem Parameter und einem Gleichheitszeichen angibt:

*parameter-declaration: // nur ein Auszug*  
*decl-specifier-seq declarator = assignment-expression*

Für einen Parameter mit einem Default-Argument muss beim Aufruf der Funktion kein Argument angegeben werden. Lässt man es aus, verwendet der Compiler das Default-Argument. Die Zuordnung der Argumente zu den Parametern ergibt sich dabei aus der Reihenfolge von links nach rechts.

In der Funktion *fd* haben alle drei Parameter Default-Argumente:

```
int fd(int x = 0, int y = 0, int z = 0)
{
    return 100 * x + 10 * y + z;
}
```

Die Funktion *fd* kann deshalb sowohl ohne Argumente als auch mit einem, zwei oder drei Argumenten aufgerufen werden. Für die am Ende der Parameterliste fehlenden Argumente setzt der Compiler dann die Default-Argumente ein:

```
int r1 = fd();           // wie fd(0, 0, 0), r1 = 0;
int r2 = fd(1);         // wie fd(1, 0, 0), r2 = 100
```

```
int r3 = fd(1, 2);    // wie fd(1, 2, 0), r3 = 120
int r4 = fd(1, 2, 3); // wie fd(1, 2, 3), r4 = 123
```

Alle auf einen Parameter mit Default-Argumenten folgenden Parameter müssen ebenfalls Default-Argumente haben. Sonst könnte der Compiler die Argumente nicht den Parametern zuordnen.

```
void f(int i, int j = 0, int k)
{ // Fehler: Fehlender Standardparameter für Parameter 2
}
```

Im Unterschied zu manchen anderen Sprachen kann man ausgelassene Parameter nicht durch Kommas markieren:

```
f(1, , 3); // in C++ nicht möglich
```

Default-Argumente sind oft eine Alternative zu überladenen Funktionen: Wenn verschiedene überladene Funktionen mit derselben Parameterliste beginnen, und die Anweisungen in den Funktionen gleich sind, erreicht man mit einer einzigen Funktion mit Default-Argumenten oft denselben Effekt wie mit mehreren überladenen Funktionen.

Beispiel: Die Standardbibliothek verwendet oft Default-Argumente. Mit der Funktion *stoi* (nach `#include <string>`) kann man einen String in eine Zahl umwandeln. Meist wird man die Ziffern der Zahl im Dezimalsystem angeben. Dann muss man das Argument 10 nicht angeben:

```
int stoi(const string& str, size_t *idx = 0, int base = 10);
```

Hier wären drei überladende Funktionen eine Alternative, die allerdings aufwendiger wäre.

Auch Funktionen mit Default-Argumenten können überladen werden. Dann muss man beim Design der Parameterlisten darauf achten, dass die Aufrufe nicht mehrdeutig werden können.

Beispiel: Die Funktionen

```
void defA(int x = 0) { }
void defA(string s = "") { }
```

werden ohne Probleme kompiliert. Der Aufruf

```
defA();
```

ist aber mehrdeutig und verursacht eine Fehlermeldung des Compilers.

Die folgenden Beispiele zeigen, wie auch Konstanten- und Referenzparameter sowie Parameter eines Klassentyps Default-Argumente haben können:

```

struct Punkt {
    Punkt(int x_, int y_) { x = x_; y = y_; }
    int x, y;
};

void ClassDefArg(Punkt p = Punkt(0, 0)) {}; // temporäres Objekt
int j;
void RefDefArg(int& i = j){};
void ConstDefArg(const int& i = j){};

```

Wenn ein Programm sowohl eine Definition als auch eine oder mehrere Deklarationen einer Funktion enthält, darf man ein Default-Argument nur einmal angeben. Gibt man es mehrfach an, ist das für den Compiler ein Fehler. Am besten gibt man es nur in der Deklaration in der Header-Datei an: Dann kann man das Default-Argument nach einem *#include* der Header-Datei auslassen.

### Aufgaben 2.4.8

1. Wenn man die Deklaration und die Definition einer Funktion auf eine Header- und eine cpp-Datei aufteilt, kann man die Default-Argumente entweder in der Header-Datei (dann aber nicht in der .cpp-Datei) angeben

```

// MeineFunktion.h
int inc(int x, int inc = 1);

// MeineFunktion.cpp
int inc(int x, int inc)
{
    return x + inc;
}

```

oder in der cpp-Datei (dann aber nicht in der Header-Datei):

```

// MeineFunktion.h
int inc(int x, int inc);

// MeineFunktion.cpp
int inc(int x, int inc = 1)
{
    return x + inc;
}

```

Nach welcher dieser beiden Alternativen kann man *inc* nach einem *#include* "MeineFunktion.h" mit nur einem Argument aufrufen?

### 2.4.9 *if* und *switch* mit Variablendefinitionen

Seit C++17 kann man vor der Bedingung in einer *if*- und *switch*-Anweisung eine Variable definieren (analog zum *init*-statement in einer *for*-Schleife):



```

if constexpr( init-statementopt condition ) statement
if constexpr( init-statementopt condition ) statement else statement
switch ( init-statementopt condition ) statement

```

Diese Variable ist dann in der *if*- und *switch*-Anweisung lokal. Bei einer *while*-Schleife steht ein solches *init-statement* nicht zur Verfügung, da man eine *for*-Schleife verwenden kann.

Eine solche Variablendefinition ist vor allem dann hilfreich, wenn die Anweisung von einem Funktionswert abhängt, der in der Anweisung verwendet werden soll.

Beispiel: Wenn man einen String mit einer Funktion wie

```

bool tryparse(std::string s, int& value)
{
    // Falls s in ein int konvertiert werden kann, return true
    // und value den in int konvertierten Wert zuweisen
}

```

in eine Zahl umwandeln will und den konvertierten Wert im then-Zweig einer *if*-Anweisung verwenden will, kann man eine Variable für die Zahl in der *if*-Anweisung definieren:

```

void mit_if_init(std::string s)
{
    if (int x; tryparse(s, x))
    {
        cout << x + 1 << endl; // verwende x
    }
    else
    {
        cout << "\"" << s << "\" ist kein int-Wert" << endl;
    }
    x++; //Fehler: außerhalb der if-Anweisung ist x nicht bekannt
}

```

Vor C++17 muss man die Variable vor der *if*-Anweisung definieren. Diese existiert dann aber auch noch nach der *if*-Anweisung.:

```

void ohne_if_init(std::string s)
{
    int x;
    if (tryparse(s, x))
        // ..
    else
        // ..
    x++; //kein Fehler: außerhalb der if-Anweisung ist x bekannt
}

```

### 2.4.10 Programmierstil für Funktionen

Wenn die Anweisungen einer Funktion zwischen ihrem **Ergebnis** und ihren Parametern eine bestimmte Beziehung herstellen, dann gilt diese Beziehung nach einem **Aufruf** der Funktion für das Ergebnis und ihre **Argumente**. Eine solche Beziehung wird auch als Nachbedingung bezeichnet (siehe Abschnitt 2.6.8). Die Nachbedingung eines Funktionsaufrufs ergibt sich also aus der Nachbedingung der Funktion, indem man die Parameter durch die Argumente ersetzt.

Beispiel: Zwischen dem Parameter  $n$  und dem Rückgabewert  $s$  besteht die als Kommentar angegebene Beziehung:

```
int Quadratsumme(int n)
{
    ...
    return s; //  $s=1^2+\dots+(n-1)^2+n^2$ 
}
```

Deshalb besteht nach dem nächsten Aufruf zwischen  $q$  und  $k$  die als Kommentar angegebene Beziehung:

```
int q = Quadratsumme(k);
//  $q=1^2+2^2+\dots+(k-1)^2+k^2$ 
```

Wie die Funktion *vertausche* von Abschnitt 2.4.5 zeigt, muss das **Ergebnis** einer Funktion nicht ihr Rückgabewert sein. Es kann es auch ein **Referenzparameter** sein.

Den Effekt von Funktionen, die kein Ergebnis zurückgeben (Rückgabetypp *void* und keine Referenzparameter) kann man so allerdings nicht beschreiben, sondern nur durch die Aktionen mit den Parametern.

Funktionsaufrufe gehören zu den am häufigsten verwendeten Anweisungen. Da sich ihre Nachbedingungen aus den Nachbedingungen der Funktion ergeben, sollte man für alle **Funktionen** präzise **Nachbedingungen** formulieren. Nachbedingungen von Anweisungen, die nicht als Ganzes eine Funktion bilden, sind dagegen meist nicht so nützlich.

Aus der Nachbedingung ergibt sich dann auch, ob eine Funktion ihre Spezifikation erfüllt. Dazu muss die **Spezifikation** so **vollständig** und **präzise** sein, dass diese Entscheidung für jedes Argument aus dem Wertebereich der Parameter möglich ist.

Aus diesem einfachen Zusammenhang zwischen einer Funktionsdefinition und ihrem Aufruf ergeben sich einige Empfehlungen, die oft auch als **Programmierstil** bezeichnet werden, da sie zur Verständlichkeit eines Programms beitragen.

1. Der **Name** der Funktion soll ihr **Ergebnis** präzise beschreiben. Dann beschreibt auch der Funktionsaufruf das Ergebnis, da eine Funktion über ihren Namen aufgerufen wird.

Beispiel: Hätte man für die Funktion *Quadratsumme* einen wenig aussagekräftigen Namen wie z.B. *f17* gewählt, würde das Ergebnis des Funktionsaufrufes trotzdem gelten:

```
int s = f17(k);
// s=12+22+...+(k-1)2+k2
```

Da dieses Ergebnis aber nicht aus dem Programmtext hervorgeht, wäre ein erläuternder Kommentar notwendig. Mit einem aussagekräftigen Namen wird das Ergebnis dagegen schon durch den Aufruf selbst ohne einen zusätzlichen Kommentar beschrieben:

```
int s = Quadratsumme(k); // kein Kommentar notwendig
```

Wenn in diesem Buch Funktionen mit Namen wie *f*, *g* usw. verwendet werden, dann vor allem, um Sprachelemente zu illustrieren.

2. Aus 1. folgt, dass eine Funktion **eine Aufgabe** haben soll, die man mit **einem aussagekräftigen Namen** beschreiben kann. Falls man keinen passenden Namen für eine Funktion findet, muss das nicht an einer mangelnden Formulierungsgabe liegen. Es kann auch ein Hinweis auf ein **Design-Problem** sein: Oft hat man zu viele verschiedene Aktionen in die Funktion gepackt, die man besser auf andere Funktionen verteilen sollte.

Beispiel: Bei Funktionen, die einen einzigen Wert zurückgeben (z.B. mathematischen Funktionen) ist die Wahl eines aussagekräftigen Namens oft einfach: *fib(n)* berechnet den *n*-ten Wert der Fibonacci-Folge, *ggT* den größten gemeinsamen Teiler usw. Falls diese kurzen Namen keine Missverständnisse befürchten lassen, sind sie ausreichend. Sonst sind längere Namen notwendig.

Bei Funktionen, die keinen oder mehr als einen Wert zurückgeben, ist das oft nicht so einfach. Es soll schon vorgekommen sein, dass ein Programmierer länger nach einem passenden Namen als nach den Anweisungen für eine Funktion gesucht hat.

Wenn der Name einer Funktion ihr Ergebnis nur unvollständig beschreibt und man sie einige Zeit später verwenden will, aber ihren genauen Inhalt nicht mehr weiß, bleibt nur die zeitraubende Lektüre der Dokumentation oder des Quelltextes. Außerdem gibt der Quelltext dann nicht genau das wieder, was beim Ablauf des Programms passiert.

3. Kein Argument sollte zu einem **Programmfehler** beim Aufruf der Funktion führen, wie z.B. einer Division durch Null, einem Überlauf, einer Endlosschleife oder dem Aufruf einer Funktion, deren Vorbedingung nicht erfüllt ist. Auch die Rückgabe eines unbestimmten Wertes ist meist ein Fehler. Um solche Fehler zu vermeiden, **prüft** man am besten **jede Anweisung** der Funktion einzeln.

Beispiel: In der Funktion *Quatsch* sind Bedingungen angegeben, die zu einem Fehler führen können. Die erste dieser beiden Bedingungen kann man leicht vor einem Aufruf der Funktion prüfen. Bei Bedingungen wie der zweiten ist das meist nicht so einfach.

```

int Quatsch(int a, int b)
{
    int s = 0, i = a;
    while (i != b) // Endlosschleife für a>b
    {
        s = s + i*i; // Überlauf für s+i*i> INT_MAX
        i++;
        if (i == b) return s; // Für a==b unbestimmter
                               // Funktionswert
    } // Warnung: Funktion sollte einen Wert zurückgeben
}

```

Der Wertebereich der Parameter einer Funktion ist oft größer als der Bereich, der in der Spezifikation für die Argumente beschrieben ist. Dann sind Aufrufe möglich, für die in der Spezifikation kein Ergebnis verlangt ist.

Beispiel: Die Spezifikation für eine Funktion wie *Quersumme* setzt oft implizit positive Argumente voraus. Falls man diese Funktion mit einem *int*-Parameter definiert, muss man auch für negative Argumente einen definierten Wert zurückgeben.

4. Falls eine Funktion nicht alle Fehler abfängt, muss man vor ihrem Aufruf die notwendigen Vorbedingungen prüfen. Das kann aber recht aufwendig sein.

Beispiel: Wenn eine Funktion *StringToInt* eine Folge von Zeichen (z.B. des Datentyps *String*) in eine Zahl umwandelt, falls ihr Argument eine Zahl darstellt, muss man vor jedem Aufruf dieser Funktion prüfen, ob das Argument eine Zahl darstellt. Diese Prüfung ist aber mit fast genauso viel Arbeit verbunden wie die Umwandlung des Strings.

```

int StringToInt(string s)
{ // Vorbedingung: s stellt eine Zahl dar
    ...
    return n; // das in int konvertierte Argument
}

```

Oft ist es einfacher, die notwendigen Prüfungen in der Funktion vorzunehmen und einen Fehler zu signalisieren, falls die Voraussetzungen nicht erfüllt sind. Dazu gibt es verschiedene Möglichkeiten: Man kann einen speziellen Funktionswert zurückgeben, ein Flag setzen, eine Exception auslösen usw. Anstatt vor dem Aufruf die Vorbedingung zu prüfen, muss dann nach dem Aufruf geprüft werden, ob ein Hinweis auf einen Fehler vorliegt.

Beispiel: Wenn man die Spezifikation der Funktion *StringToInt* so ändert, dass sie entweder den Parameter in eine Zahl umwandelt oder einen Fehler signalisiert, wenn das nicht möglich ist, kann man sie aufrufen, ohne vor dem Aufruf prüfen zu müssen, ob das Argument eine Zahl darstellt.

```

int StringToInt(string s)
{ // Vorbedingung: true
    ...
}

```

```

        if (string_is_convertible) return n;
        else signal_error; // irgendein Hinweis
    } // Nachbedingung: das in int umgewandelte Arg.
    // oder ein Hinweis auf einen Fehler

```

Funktionen mit **schwächeren Vorbedingungen** sollte man gegenüber solchen mit stärkeren Vorbedingungen **bevorzugen**: Je weniger Voraussetzungen man vor einem Funktionsaufruf prüfen muss, desto weniger kann man falsch machen.

5. Eine Funktion sollte **übersichtlich**, **verständlich** und leicht **testbar** sein. Obwohl diese Kriterien nur schwer quantifizierbar sind, tragen die folgenden Faktoren dazu bei.

- Empfehlungen für die maximale **Größe** von Funktionen reichen von einer Bildschirm- oder Druckseite bis zu ca. 200 Zeilen. Von längeren Funktionen wird meist abgeraten.
- Zu tiefe Verschachtelungen sollten vermieden werden: Möglichst keine verschachtelten Schleifen und bei bedingten Anweisungen nicht mehr als 3 Stufen.
- Die **Anzahl der Parameter** sollte nicht allzu groß sein (z.B.  $\leq 5$ ). In der Literatur findet man oft Obergrenzen von ca. 7 Parametern, die mit Ergebnissen von psychologischen Untersuchungen begründet werden. Falls eine Funktion mehr Parameter benötigt, sollte man versuchen, solche Parameter zusammenzufassen (z.B. mit *struct* oder *class*, siehe Abschnitt 5.1 und Abschnitt 8.1), die eine logische Einheit bilden.
- Das Ergebnis einer globalen Funktion sollte sich allein aus den Parametern ergeben. Dann enthält ein Funktionsaufruf alle Faktoren, die sich auf das Ergebnis auswirken. Elementfunktionen von Klassen können auch Datenelemente verwenden. Globale Variable sollten aber nicht in das Ergebnis eingehen. Wenn in Beispielen oder Lösungen der Übungsaufgaben globale Variablen verwendet werden, dann nur, weil Klassen und Elementfunktionen (siehe Kapitel 8) bisher noch nicht behandelt wurden.
- Ihre **Komplexität** sollte nicht allzu groß sein. Als Maßzahl dafür wird oft die Anzahl ihrer bedingten Anweisungen und Schleifen verwendet. Dabei trägt jedes *if*, *for*, *while*, *do* und *case* (in einer *switch*-Anweisung) mit dem Wert 1 zu dieser Anzahl bei. Ein *else* erhöht diese Anzahl dagegen nicht.  
Bezeichnet man diese Anzahl mit *s*, wird der Wert *s*+1 auch als **zyklomatische Komplexität** bezeichnet. Diese sollte nicht größer als 10 sein.

Beispiel: Die Funktion *f* hat die zyklomatische Komplexität 7. Die Beiträge der einzelnen Anweisungen sind als Kommentar angegeben:

```

// zyklomatische Komplexität
int f(int x, int y)    // 1
{ // inhaltlich Unsinn
    int s = 0;
    if (x<y)            // 2
        s = x + y;
    while (s<x && s<y)  // 3,4 - 2 Bedingungen
    {
        s = s + y;
    }
    for (int i = 0; i<5; i++) // 5

```

```

{
    if (i == 0) s++;          // 6
    else if (i == 1) s--;    // 7 - nur if zählt
    else s--;
    s++;
}
return s;
}

```

6. Die Entwicklung eines umfangreichen Anwendungsprogramms unterscheidet sich von den Übungsaufgaben in einem Lehrbuch vor allem durch ihre wesentlich höhere Komplexität.

Diese Komplexität lässt sich meist nur dadurch bewältigen, dass man die Aufgabe in **einfachere Teilprobleme** zerlegt und diese dann in eigenen Funktionen löst. Eine solche Vorgehensweise wird als **schrittweise Verfeinerung** bezeichnet und ist eine der wichtigsten Strategien zur Lösung von Problemen. Sie kommt auch in der schon Julius Cäsar zugeschriebenen Devise „teile und herrsche“ zum Ausdruck. Stroustrup (1997, Abschnitt 23.2) fasst das mit den Worten „There is only one basic way of dealing with complexity: divide and conquer“ zusammen.

Um diese Strategie anzuwenden, muss man

1. geeignete Teilprobleme finden.

Das ist keineswegs trivial, da es keine festen Regeln dafür gibt, wie man ein umfangreiches Gesamtproblem optimal (was immer das auch sein mag) in Bausteine zerlegen kann. Es sagt einem nämlich niemand (anders als bei den Aufgaben in einem Lehrbuch), welche Anweisungen man zu einer Funktion zusammenfassen soll.

Ghezzi (1991, S. 125) bezeichnet das **Design** eines umfangreichen Softwaresystems als kreative Aktivität, die man nicht automatisieren kann. Mit den Worten von Stroustrup (1997, Abschnitt 23.2): „...the selection of the parts and the specification of the interfaces between the parts is where the most experience and taste is required.“

2. nachweisen, dass die Funktionen auch zusammenpassen und das Problem gemeinsam lösen.

Ein Nachweis, dass diese Funktionen zusammenpassen, ist oft nur dadurch möglich, dass man eine Bedingung findet, die vor und nach dem Aufruf jeder dieser Funktionen gilt. Eine solche Bedingung wird als **Invariante** (siehe Abschnitt 2.6.8) bezeichnet, die bei den Elementfunktionen einer Klasse auch als **Klasseninvariante** (siehe Abschnitt 8.1.7) bezeichnet wird. Dabei ist die größte Schwierigkeit meist, eine solche gemeinsame Bedingung zu finden. Wenn man sie gefunden hat, ist es meist nicht so schwierig, Funktionen zu schreiben, die diese Bedingung herstellen, und nachzuweisen, dass sie das auch tatsächlich tun.

7. Gelegentlich findet man Empfehlungen für **Funktionsnamen** wie diese:

- Verben oder Kombinationen von Verben mit Substantiven für Funktionen, die für eine Aktion stehen (Rückgabotyp *void*).
- Adjektive oder mit „ist“ beginnende Namen für Funktionen, die einen booleschen Wert zurückgeben.

- Substantive für Funktionen, die einen Wert zurückgeben.

Solche Regeln sollte man aber nicht überbewerten. Die folgenden Varianten sind oft gleichermaßen aussagekräftig:

*Message, DisplayMessage, displayMessage oder display\_message*  
*prim, IstPrim, istPrim oder ist\_prim*

Wichtiger als solche detaillierten Vorschriften sind oft **einheitliche Namens- und Parameterkonventionen**. Sie ermöglichen den Aufruf einer Funktion, ohne dass man jedes Mal mühsam nach der genauen Schreibweise suchen muss. Ähnliche Funktionen sollten **ähnliche Parameterlisten** haben. In diesem Punkt sind die Funktionen der C-Bibliotheken nicht immer vorbildlich: Beispielsweise erwarten *fread* und *fwrite* den FILE-Stream immer als letztes Argument. Bei *fseek* muss er dagegen das erste Argument sein.

### Aufgaben 2.4.10

1. Versuchen Sie, einen passenden Namen für die folgende Funktion zu finden:

```
double doit_babe(double i, int *p1, int p2, float p3)
{
    int y;
    if (p2 == 1)
        for (int j = 0; j <= i; j++) y = y + i;
    else if (i == 2) y = Mehrwertsteuer(p2, 5);
    else if (i == 3) y = druckeAdressaufkleber(p2);
    return y;
};
```

2. Beschreiben Sie für die Funktionen

```
int Plus(int a, int b)    { return a - b; }
int Minus(int a, int b)  { return a*b; }
int Product(int a, int b) { return a + b; }
```

das Ergebnis des Ausdrucks

```
int x = Plus(1, Product(Minus(3, 4), Plus(5, 6)));
```

### 2.4.11 Rekursive Funktionen

Die einführende Darstellung von Funktionen und Parametern in den Abschnitten 2.4.3 und 2.4.5 ist für viele Anwendungen ausreichend. Für ein Verständnis von gegenseitigen Funktionsaufrufen und rekursiven Funktionen ist aber ein Verständnis der internen Implementation von Funktionen und Funktionsaufrufen hilfreich.

Funktionsaufrufe und ihre Rücksprungadressen werden über einen **Stack** verwaltet. Für einen Stack stehen im Wesentlichen nur zwei Operationen zur Verfügung: Mit **push** wird ein

Element oben auf dem Stack abgelegt bzw. mit **pop** das oberste Element vom Stack genommen.

Der Programmablauf bei Funktionsaufrufen wird folgendermaßen realisiert: Jedes laufende Programm besitzt einen Aufruf-Stack, auf dem der **Prozessor** immer die Adresse der auf den aktuellen Funktionsaufruf folgenden Anweisung findet. Sobald er die letzte Anweisung in einer Funktion ausgeführt hat, holt er diese Adresse vom Stack und führt als Nächstes diese Anweisung aus. Der Aufruf-Stack wird folgendermaßen verwaltet:

- Bei der Übersetzung einer **Funktionsdefinition** merkt sich der **Compiler** zunächst die Adresse der ersten Anweisung, die zur Funktion gehört. Danach übersetzt er alle Anweisungen dieser Funktion bis zum Ende der Funktionsdefinition. Das entsprechende „/“ erkennt der Compiler dadurch, dass er die Klammern „{“ und „}“ seit dem Beginn der Funktionsdefinition mitzählt: Sobald er so viele „/“ wie „{“ gesehen hat, erzeugt er eine Sprunganweisung an die aktuelle Rücksprungadresse auf dem Stack. Auch bei einer *return*-Anweisung wird eine solche Anweisung erzeugt.
- Wenn der **Compiler** einen **Funktionsaufruf** übersetzt, erzeugt er eine Anweisung, durch die der Prozessor die Adresse der nächsten auszuführenden Anweisung (nach dem Funktionsaufruf) auf den Stack legt. Anschließend erzeugt er einen Sprung auf die erste Anweisung der aufgerufenen Funktion.
- Außerdem werden die Argumente auf dem Stack übergeben.

Wenn eine Funktion in dem Block aufgerufen wird, der zu ihrer Definition gehört, bezeichnet man sie als rekursiv. **Rekursive Funktionen** ermöglichen oft einfache Lösungen rekursiv formulierter Probleme.

Beispiel: Die Summe  $s(n)$  der ersten  $n$  Zahlen

$$\begin{aligned} s(n) &= 0 + 1 + 2 + \dots + (n-1) + n \\ &= \underbrace{\hspace{10em}}_{s(n-1)} + n \end{aligned}$$

kann rekursiv definiert werden durch

$$s(n) = \begin{cases} 0, & \text{falls } n \leq 0 \\ s(n-1) + n, & \text{falls } n > 0 \end{cases}$$

In diesem Beispiel sind die Funktionswerte für  $n \leq 0$  explizit definiert und können unmittelbar bestimmt werden. Die nicht explizit definierten Funktionswerte für  $n > 0$  können dagegen nicht direkt aus der Definition bestimmt werden und erfordern rekursive Zwischenschritte:

Beispiel:  $s(2) = 2 + s(1)$  //  $s(2)$  ist nach der rekursiven Definition  $2 + s(1)$   
 $= 2 + 1 + s(0)$  //  $s(1)$  ist nach der rekursiven Definition  $1 + s(0)$   
 $= 2 + 1 + 0$  //  $s(0)$  ist nach der rekursiven Definition  $0$   
 $= 3$  // Jetzt erst kann man die Summanden summieren.



Die rekursive Definition von  $s(n)$  aus dem ersten Beispiel lässt sich unmittelbar in eine rekursive Funktion übersetzen:

```
int s(int n)
{
    if (n <= 0) return 0;    // Abbruchbedingung
    else return s(n-1) + n;  // rekursiver Aufruf
}
```

Ruft man diese Funktion mit einem Argument  $n \leq 0$  auf, wird unmittelbar der Funktionswert 0 zurückgegeben. Für  $n > 0$  wird dagegen beim Aufruf von  $s(n)$  auch  $s(n-1)$  aufgerufen. Falls auch  $n-1 > 0$  ist, wird beim Aufruf von  $s(n-1)$  auch noch  $s(n-2)$  aufgerufen. Diese Verschachtelung von Aufrufen wird so lange fortgeführt, bis  $n=0$  ist.

Anfänger sehen rekursive Funktionen oft als etwas Mysteriöses an und wundern sich, wie das überhaupt funktionieren kann. Rekursive Aufrufe sind aber einfach deswegen möglich, weil bei jedem Aufruf einer Funktion die Rücksprungadresse (die Adresse der auf den Aufruf folgenden Anweisung) auf den Stack gelegt wird. Diese Technik ermöglicht auch rekursive Aufrufe. Außerdem werden alle lokalen Variablen auf den Stack gelegt, und dazu gehören insbesondere auch die Parameter.

Beispiel: Ein Aufruf von  $s(2)$  führt zu den in der linken Spalte aufgeführten Anweisungen. In den rechten Spalten ist angegeben, wie die lokalen Variablen auf dem Stack abgelegt werden (ohne die Rücksprungadressen):

Stack ---->

|                     |   |   |   |   |   |   |
|---------------------|---|---|---|---|---|---|
| Aufruf s(2)         | n | s |   |   |   |   |
| n = Argument        | 2 |   |   |   |   |   |
| Aufruf s(1)         | – | – | n | s |   |   |
| n = Argument        | – | – | 1 |   |   |   |
| Aufruf s(0)         | – | – | – | – | n | s |
| n = Argument        | – | – | – | – | 0 |   |
| s = 0               | – | – | – | – |   | 0 |
| // s(0)=0 berechnet | – | – | – | – |   |   |
| s = s(0) + n        | – | – |   | 1 |   |   |
| // s(1)=1 berechnet | – | – |   |   |   |   |
| s = s(1) + n        |   | 3 |   |   |   |   |
| // s(2)=3 berechnet |   |   |   |   |   |   |

Beim Aufruf von  $s(2)$  werden zuerst die lokalen Variablen  $n$  und  $s$  auf dem Stack angelegt. Dann erhält  $n$  den Wert des Arguments. In der nächsten Anweisung

$s = n + s(n-1)$

wird zuerst die rechte Seite ausgewertet. Da diese Auswertung mit einem erneuten Aufruf der Funktion  $s$  verbunden ist, werden neue lokale Variablen  $s$  und  $n$  auf dem Stack angelegt. Sie verdecken die vorher angelegten Variablen  $s$  und  $n$ , was durch „–“ dargestellt wird.

Diese Schritte werden so lange wiederholt, bis ein Aufruf von  $n$  nicht mehr mit einem rekursiven Aufruf verbunden ist. Der dabei berechnete Wert  $s(0)$  wird dann zur Berechnung von  $s$  im Aufruf von  $s(1)$  usw. verwendet, bis schließlich der Wert von  $s(2)$  zurückgegeben wird.

Offensichtlich können rekursive Funktionen den **Stack kräftig beanspruchen**. Wollte man mit der rekursiven Funktion  $s$  die Summe der ersten 100 000 Zahlen berechnen, würde man 100 000 Mal ca. 10 Bytes auf den Stack legen. Das ist aber alles andere als optimal, da die Verwaltung des Stacks auch Zeit braucht.

Außerdem besteht bei rekursiven Funktionen die Möglichkeit, dass die rekursiven Aufrufe wie bei einer **Endlosschleife** nicht abbrechen, wenn eine Abbruchbedingung vergessen oder falsch formuliert wird. Bei der Funktion  $s$  wäre das etwa dann der Fall, wenn die Abbruchbedingung

```
if (n <= 0) s = 0
```

durch

```
if (n == 0) s = 0
```

ersetzt würde und  $s$  mit einem negativen Argument aufgerufen wird.

Im Unterschied zur rekursiven hat die iterative Lösung

```
int s(int n)
{
    int sum = 0;
    for (int i = 1; i <= n; i++) sum = sum + i;
    return sum;
}
```

den Vorteil, dass sie wesentlich weniger Speicherplatz auf dem Stack erfordert und deutlich schneller ist. Die rekursive Version der Funktion  $s$  ist also äußerst ineffektiv. Sie wurde nur behandelt, um die Funktionsweise rekursiver Funktionen an einem besonders einfachen Beispiel aufzuzeigen.

Unabhängig von irgendwelchen technischen Einschränkungen ist ein **Problem** dann durch eine **rekursive** Funktion **lösbar**, wenn die folgenden beiden Voraussetzungen erfüllt sind:

1. Es kann in bestimmten Spezialfällen explizit gelöst werden. Diese Spezialfälle entsprechen den Abbruchbedingungen.
2. Alle anderen Fälle führen in endlich vielen Schritten auf eine Abbruchbedingung (Rekursionsschritte).

Iterative und rekursive Lösungen sollen anhand eines weiteren Beispiels verglichen werden. Das sogenannte **Pascal-Dreieck** (nach dem Mathematiker Blaise Pascal) entsteht dadurch, dass man zunächst die Zahl 1 in eine Zeile schreibt. Die nächste Zeile entsteht dann aus der

vorhergehenden, indem man die Summe der darüber stehenden bildet, wobei man sich links von der ersten und rechts von der letzten eine Null denkt.

|   |   |   |   |       |   |    |   |   |   |
|---|---|---|---|-------|---|----|---|---|---|
|   |   |   |   | 1     |   |    |   |   |   |
|   |   |   |   | 1     |   | 1  |   |   |   |
|   |   |   | 1 |       | 2 |    | 1 |   |   |
|   |   | 1 |   | 3     |   | 3  |   | 1 |   |
|   | 1 |   | 4 |       | 6 |    | 4 |   | 1 |
| 1 |   | 5 |   | 10    |   | 10 |   | 5 |   |
|   |   |   |   | ..... |   |    |   |   |   |

Bezeichnet man die  $k$ -te Zahl in der  $n$ -ten Zeile des Pascal-Dreiecks mit  $p(n,k)$ , dann ist  $p(n,k)$  für  $0 \leq k \leq n$  definiert durch:

$$p(n,k) = \begin{cases} 1, & \text{falls } (n=0) \text{ oder } (k=n) \\ p(n-1,k-1) + p(n-1,k) & \text{sonst} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{// eine Zahl ist die Summe der} \\ \text{// beiden darüber stehenden} \end{array}$$

Sowohl  $n$  als auch  $k$  werden dabei ab 0 gezählt.

Beispiel:

$$p(0,0) = 1$$

$$p(1,0) = 1 \quad p(1,1) = 1$$

$$p(2,0) = 1 \quad p(2,1) = 2 \quad p(2,2) = 1 \quad \text{usw.}$$

Eine rekursive Funktion zur Berechnung von  $p(n,k)$  lässt sich unmittelbar aus der rekursiven Definition von  $p(n,k)$  ableiten. Bei dieser Lösung muss man gar nicht viel überlegen – es genügt, die Definition abzuschreiben:

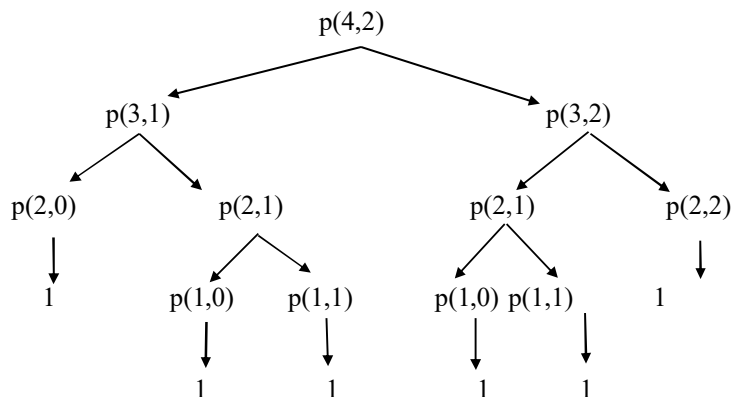
```
long long p(int n, int k)
{
    if ((0 <= k) && (k <= n))
        if ((k == 0) || (k == n)) return 1;
        else return p(n-1, k-1) + p(n-1, k);
    else return 0; //außerhalb des Dreiecks alles auf 0 setzen
}
```

Eine Messung der Rechenzeiten von  $p(n,k)$  ergab etwa die folgenden Werte:

| ca. 1982 auf einem AppleII+<br>mit Apple Pascal |         | Visual Studio 2019 x64<br>auf einem Core i5 |          |
|-------------------------------------------------|---------|---------------------------------------------|----------|
| p(14,7)                                         | 18 Sek  | p(30,15)                                    | 0,7 Sek. |
| p(15,7)                                         | 33 Sek  | p(31,15)                                    | 1,4 Sek. |
| p(16,8)                                         | 65 Sek  | p(32,16)                                    | 2,8 Sek. |
| p(17,8)                                         | 130 Sek | p(33,16)                                    | 5,6 Sek. |

Unabhängig von den tatsächlichen Zeiten zeigen beide Vergleiche dasselbe Grundverhalten: Erhöht man  $n$  in der Mitte des Pascal-Dreiecks um 1, verdoppelt sich die Rechenzeit. Dieses

Verhalten wird sofort verständlich, wenn man sich die Struktur der Aufrufe veranschaulicht, z.B. bei der Berechnung von  $p(4,2)$ :



Hier wird  $p(2,1)$  zweimal berechnet, da sich die rekursive Funktion nicht „merken kann“, dass sie diesen Wert bereits berechnet hat. Solche Mehrfachberechnungen führen dazu, dass bei der Berechnung von  $p(16,8)$  die kompletten Verzweigungen unter  $p(15,7)$  und  $p(15,8)$  durchgerechnet werden, wodurch sich der Rechenaufwand bei jeder Erhöhung von  $n$  um 1 verdoppelt.

Während sich die rekursive Version der Funktion  $p$  direkt aus der Definition des Pascal-Dreiecks ergab, ist kaum unmittelbar einsichtig, dass eine iterative Funktion zur Berechnung von  $p(n,k)$  durch die Funktion  $bin$  (Binomialkoeffizient) gegeben ist:

```

long long bin(int n, int k)
{ // Berechnet den Binomialkoeffizienten "n über k"
  long long b;
  if ((0 <= k) && (k <= n)) b = 1;
  else b = 0;
  for (int i = 1; i <= k; i++)
    b = b*(n-i + 1) / i;
  return b;
}

```

Diese Funktion liefert ihre Ergebnisse im Unterschied zur rekursiven Lösung im Bruchteil einer Sekunde, da höchstens  $(n-k)$  Multiplikationen und Divisionen notwendig sind.

Das Beispiel zeigt, dass **rekursive Lösungen oft einfacher** und eleganter als iterative formuliert werden können. Allerdings ist die Funktion  $p$  derart **ineffektiv**, dass man sie kaum in einem realen Programm verwenden kann. Sie kann aber nützlich sein, um die Ergebnisse einer nichtrekursiven mit denen einer rekursiven Version zu vergleichen:

```

void test()
{
  for (int n = 0; n <= 10; n++)
    for (int k = 0; k <= n; k++)

```

```

{
    long long p1 = p(n, k), b = bin(n, k);
    if (p1 != b)
        cout << "(" << n << ", " << k << "): p=" << p1 << " b=" << b
                << endl;
}
}

```

Allerdings muss **nicht jede rekursive Lösung ineffektiv** sein. Es gibt zahlreiche rekursive Algorithmen, bei denen die Rekursionstiefe nicht allzu groß wird und bei denen keine unnötigen Mehrfachberechnungen auftreten. Wenn diese dann noch wesentlich einfacher sind als entsprechende iterative Verfahren, ist die rekursive Lösung vorzuziehen. Oft ist auch die in Abschnitt 4.5 vorgestellte dynamische Programmierung eine effiziente Alternative zu rekursiven Funktionen.

### Aufgaben 2.4.11

Schreiben Sie die Lösungsfunktionen in eine wie in Abschnitt 1.2.5 beschriebene Header-Datei (z.B. in die schon in Aufgabe 2.4.4 angelegte Header-Datei) und rufen Sie diese auf.

1. Schreiben Sie die folgenden Funktionen als rekursive Funktionen. Alle diese Aufgaben sind lediglich Übungen zur Formulierung rekursiver Funktionen. Keine der so erhaltenen Lösungen ist bezüglich der Effizienz mit der iterativen Lösung vergleichbar.
  - a) Fakultät (siehe Aufgabe 2.5, 3.).
  - b) Fibonacci-Zahlen (siehe Aufgabe 2.4.4, 3.).
  - c) Die Funktion  $ggT$  soll den größten gemeinsamen Teiler von zwei Werten als Funktionswert zurückgeben.
  - d) Schreiben Sie eine Funktion, die die Ergebnisse der Funktionen von a) bis c) mit denen von entsprechenden iterativen Funktionen vergleicht.

### 2. Die Ackermann-Funktion

$$\text{ack}(n, m) = \begin{cases} m+1 & \text{für } n=0 \\ \text{ack}(n-1, 1) & \text{für } m=0 \\ \text{ack}(n-1, \text{ack}(n, m-1)) & \text{sonst} \end{cases}$$

setzt mit dem Index  $n$  (ab  $n=1$ ) in gewisser Weise die „Folge“ Addition, Multiplikation, Potenzierung fort. Für die ersten Werte von  $n$  gilt:

$$\begin{aligned}
 \text{ack}(0, m) &= m + 1 \\
 \text{ack}(1, m) &= m + 2 \\
 \text{ack}(2, m) &= 2 * m + 3 \\
 \text{ack}(3, m) &= 2^{m+3} - 3
 \end{aligned}$$

Definieren Sie die rekursive Funktion  $ack$  und vergleichen Sie ihre Werte bis  $n=3$  und  $m=10$  mit den expliziten Formeln. Wegen

$$\begin{aligned}\text{ack}(4,m) &= \text{ack}(3,\text{ack}(4,m-1)) = 2^{(\text{ack}(4,m-1)+3)} - 3 \quad // \quad 2^{\text{ack}(4,m-1)+3} - 3 \\ &= 2^{\{2^{(\text{ack}(4,m-2)+3)} - 3\} + 3} - 3\end{aligned}$$

ergibt sich für  $\text{ack}(4,m)$  ein Wert in der Größenordnung

$$\begin{array}{c} 2 \\ 2 \\ \dots \\ \text{ack}(4,m) = 2 \end{array}$$

wobei der „Turm der Potenzen“  $m+3$  Glieder hoch ist. Offensichtlich wächst diese Funktion sehr schnell: Bereits  $\text{ack}(4,2)$  hat 19729 Dezimalstellen. Mit  $n > 4$  erhält man ein noch schnelleres Wachstum.

### 2.4.12 Die *switch*-Anweisung $\Theta$

Die Auswahl einer aus mehreren Anweisungen ist nicht nur mit einer verschachtelten *if*-Anweisung möglich, sondern auch mit einer ***switch*-Anweisung**. Allerdings müssen die folgenden **Voraussetzungen** erfüllt sein:

1. Die Bedingung, aufgrund der die Auswahl der Anweisung erfolgt, muss dadurch gebildet werden, dass ein Ausdruck auf Gleichheit mit einer Konstanten geprüft wird. Bedingungen mit den Operatoren  $<$ ,  $<=$ ,  $!=$ ,  $>$  und  $>=$  können also nicht verwendet werden, ebensowenig wie Bedingungen, bei denen ein Ausdruck nicht mit einer Konstanten verglichen wird.
2. Der Datentyp der zum Vergleich herangezogenen Ausdrücke muss ein Ganzzahl- oder ein Aufzählungstyp sein. Gleitkommatentypen und Strings können nicht verwendet werden.

Obwohl diese Voraussetzungen auf den ersten Blick recht einschränkend wirken, sind sie in der Praxis häufig erfüllt: Bei vielen Programmen kann ein Großteil der Auswahlanweisungen mit einer *switch*-Anweisung formuliert werden.

```
switch ( condition ) statement
```

Hier muss der Datentyp des Ausdrucks *condition* ein Ganzzahl- oder ein Aufzählungstyp sein. Die Anweisung nach (*condition*) ist meist eine Verbundanweisung. In ihr kann man vor jeder Anweisung eine oder mehrere **case-Marken** angeben:

```
case constant-expression :
```

Dieser konstante Ausdruck muss einen ganzzahligen Datentyp haben. Die Werte aller Konstanten einer *switch*-Anweisung müssen verschieden sein. Außerdem kann vor höchstens einer der Anweisungen eine **default-Marke** stehen:

```
default :
```

Bei der Ausführung einer *switch*-Anweisung wird die Anweisung ausgeführt, die auf die *case*-Marke mit dem Wert von *condition* folgt. Gibt es keine *case*-Marke mit diesem Wert,

wird die auf *default* folgende Anweisung ausgeführt oder, wenn sie keine *default*-Marke besitzt, ohne die Ausführung einer Anweisung verlassen.

Nach der Ausführung der Anweisung, die auf eine *case*- oder eine *default*-Marke folgt, werden die darauffolgenden Anweisungen ausgeführt, unabhängig davon, ob vor ihnen weitere *case*- oder *default*-Marken stehen. Insbesondere wird eine *switch*-Anweisung nicht mit dem Erreichen der nächsten Marke beendet. Die *switch*-Anweisung verhält sich in dieser Hinsicht wie eine *goto*-Anweisung.

Wie schon am Anfang dieses Abschnitts bemerkt wurde, wird die ***switch*-Anweisung** oft zur Auswahl einer aus mehreren Anweisungsfolgen verwendet. Diese Anweisungsfolgen werden dann durch verschiedene *case*-Marken begrenzt. Damit die *switch*-Anweisung nach der Ausführung einer solchen Anweisungsfolge verlassen wird, verwendet man eine *break*-Anweisung (siehe Abschnitt 2.4.14).

Beispiel: Die *switch*-Anweisung in

```
std::string NoteToString(int Note)
{
    switch (Note)
    {
        case 1: return "sehr gut!!!";
            break;
        case 2: return "gut";
            break;
        case 3: return "na ja";
            break;
        case 4: return "schwach";
            break;
        case 5:
        case 6: return "durchgefallen";
            break;
        default: return "Unzulässige Note ";
    }
}
```

hat dasselbe Ergebnis wie die verschachtelte *if*-Anweisung:

```
if (Note == 1) return "sehr gut!!!";
else if (Note == 2) return "gut";
else if (Note == 3) return "na ja";
else if (Note == 4) return "schwach";
else if ((Note == 5) or (Note == 6))
    return "durchgefallen";
else return "Unzulässige Note ";
```

Wie dieses Beispiel zeigt, können für verschiedene Werte von *condition* (hier die Werte 5 und 6) dieselben Anweisungen ausgeführt werden, indem verschiedene *case*-Marken ohne weitere Anweisungen (insbesondere ohne ein *break*) aufeinander folgen.

In Abschnitt 5.2.2 wird gezeigt, wie man eine *switch*-Anweisung für einen Aufzählungstyp mit einem Code-Ausschnitt erzeugen kann.

In einer *switch*-Anweisung wird eine *case*-Marke angesprungen, auch wenn sie in einer anderen Anweisung enthalten ist.

Beispiel: Die folgenden Anweisungen werden ohne Warnung oder Fehlermeldung kompiliert. Sie setzen *s* auf 7, da nach der Ausführung von *s=s+3* auch noch *s=s+4* ausgeführt wird.

```
int x = 1, s = 0;
switch (x)           // kompletter Schwachsinn
{
  case 3: s = s + 1;
    if (x == 2)
  case 0: s = s + 2;
    else
  case 1: s = s + 3;
  case 2: s = s + 4;
    break;
  default: s = -1;
}
```

Wie dieses Beispiel zeigt, unterscheidet sich die *switch*-Anweisung in ihrem Sprungverhalten nicht von einer *goto*-Anweisung (siehe Abschnitt 2.4.14). Deshalb sind damit auch dieselben undefinierten Ergebnisse wie mit einer *goto*-Anweisung möglich. Solche Konstruktionen müssen vermieden werden.

Da die *switch*-Anweisung nicht verlassen wird, wenn die Anweisungen nach einer *case*-Marke abgearbeitet sind und die nächste erreicht wird, muss man immer darauf achten, dass nicht versehentlich ein *break* vergessen wird. Ohne *break* werden alle folgenden Anweisungen der *switch*-Anweisung ausgeführt, unabhängig davon, ob vor ihnen weitere *case*- oder *default*-Marken stehen.

Beispiel: Durch diese Anweisungen erhält *i* den Wert 4:

```
int k = 1, i = 0;
switch (k)
{
  case 1: i = i + 1; // i=1
  case 2: i = i + 1; // i=2
  case 5:
  case 6: i = i + 1; // i=3
  default: i = i + 1; // i=4
}
```



### Aufgaben 2.4.12

Lösen Sie die folgenden Aufgaben mit *switch*- anstelle von *if*-Anweisungen. Falls eine der Aufgaben nicht lösbar ist, geben Sie den Grund dafür an.

1. Aufgabe 2.4.1, 3 (Material- und Lagergruppe)
2. Aufgabe 2.4.1, 4 (Datumsvergleich)

### 2.4.13 Bedingte Kompilation mit *if constexpr*

Mit *if constexpr* kann man ähnlich wie mit den Makros für die bedingte Kompilation (siehe Abschnitt 2.11.3) steuern, dass bestimmte Anweisungen übersetzt werden und andere nicht. Wenn eine Bedingung während der Kompilation nicht erfüllt ist, wird der entsprechende Zweig nicht übersetzt.

*if constexpr* ist aber meist keine Alternative zur bedingten Kompilation mit Makros, da sich diese folgendermaßen unterscheiden:

1. Ein *#if* kann an einer beliebigen Stelle im Quelltext stehen und sowohl Deklarationen als auch Anweisungen umfassen. Ein *if constexpr* ist dagegen eine Anweisung und kann nur innerhalb eines Blocks stehen.

Beispiel: Makros zur bedingten Kompilation kann man außerhalb eines Blocks nicht durch *if constexpr* ersetzen:

```
enum class Target { Linux, Windows };
#ifdef Linux
    constexpr Target target = Target::Linux;
    #include "Linux_API_Funktionen.h"
#else
    constexpr Target target = Target::Windows;
    #include "Windows_API_Funktionen.h"
#endif
```

2. Verwendet man nach *#if* ein nicht definiertes Symbol, wird es vom Compiler als der Wert 0 ausgewertet. Damit wird der *#else*-Zweig kompiliert, ohne dass der Compiler darauf hinweist, dass das Symbol nicht definiert ist:

```
#if DEBUG //Schreibfehler: gemeint war _DEBUG – keine Fehlermeldung
    //debug code
#else
    //release code – wird unabhängig vom Wert von _DEBUG kompiliert
#endif
```

Die Bedingung und die Anweisungen in einem *if constexpr* Zweig müssen im Unterschied zu denen in einem *#if*-Zweig kompilierbar sein. Deshalb erhält man mit

```
if constexpr (DEBUG) // gemeint war _DEBUG –Fehlermeldung
```

eine Fehlermeldung, wenn `DEBUG` nicht definiert ist. Da `_DEBUG` auch bei einer Kompilation im Release-Modus nicht definiert ist, wird auch diese Version nicht kompiliert:

```
if constexpr (_DEBUG) // Fehler: Der Bezeichner _DEBUG ist im
{                      // Release-Mode nicht definiert
    // debug code
}
else
{
    // release code
}
```

Beispiel: Mit den Anweisungen aus dem letzten Beispiel werden auch die folgenden Anweisungen nicht übersetzt, da entweder nur die Linux- oder die Windows-Funktionen mit `#include` eingebunden werden:

```
if constexpr (target == Target::Linux)
{
    call_Linux_API_Function(); // Fehler: call_Linux_API_-
                               // Function nicht definiert
}
else
{
    call_Windows_API_Function();
}
```

nicht kompiliert werden, da nur eine der beiden

*if constexpr* wird oft in Templates zusammen mit type traits verwendet, um die Kompilation in Abhängigkeit vom Datentyp des Typ-Arguments zu steuern (siehe Abschnitt 14.4.4)

#### 2.4.14 Die Sprunganweisungen *goto*, *break* und *continue* Θ

Durch eine Sprunganweisung wird das Programm an einer anderen Stelle fortgesetzt.

*jump-statement:*  
`break ;`  
`continue ;`  
`return expression opt ;`  
`goto identifier ;`

Bei der *goto*-Anweisung muss der Bezeichner nach *goto* eine Sprungmarke (*label*) sein. Eine solche Sprungmarke wird dadurch definiert, dass man sie zusammen mit einem Doppelpunkt vor eine Anweisung schreibt. Die Ausführung einer *goto*-Anweisung bewirkt, dass als nächste Anweisung die Anweisung ausgeführt wird, die auf das angesprungene Label folgt. Solche Sprünge sind nur innerhalb einer Funktion möglich.

Beispiel: Die Funktion *f3nplus1a* entspricht etwa der Assemblyausgabe (Projekt|Eigenschaften|Konfigurationseigenschaften|C/C++|Ausgabedateien) von *f3nplus1* (Aufgabe 2.4.7, 6.).

```

int f3nplus1a(int n)          int f3nplus1a(int n)
{                               {
    if (n <= 0) return -1;      if (n <= 0) return -1;
    int m = 0;                 int m = 0;
L1: if (n == 1) goto L9;        while (n != 1)
    m++;                        {
L2: if (n & 1) goto L4;          m++;
    n = n / 2;                  if (n % 2 == 1) n = 3 * n +
1;                               else n = n / 2;
    goto L5;                    }
L4: n = 3 * n + 1;              }
L5: if (n != 1) goto L1;        return m;
L9: return m;                  };
}

```

In den Anfangszeiten der Programmiersprachen war das *goto* oft (fast) die einzige Kontrollstruktur, da es direkt in eine entsprechende Anweisung des Prozessors übersetzt werden kann. Mit diesem *goto* mussten dann fast alle Schleifen, *if*-Anweisungen, Funktionsaufrufe usw. realisiert werden. Da mit *goto*-Anweisungen die Reihenfolge, in der die Anweisungen im Programm stehen, völlig von der abweichen kann, in der sie ausgeführt werden, werden solche Programme leicht unübersichtlich.

Außerdem kann man mit *goto*-Anweisungen Programme schreiben, deren Auswirkungen nicht definiert sind! Zu den undefinierten *goto*-Anweisungen gehört ein Sprung in eine Auswahlanweisung und in eine Schleife. Solche Sprünge werden von den meisten C++-Compilern nicht als Fehler bemängelt:

Da man aber doch manchmal aus einer Schleife springen möchte, wurde die Anweisung ***break*** erfunden. Sie kann nur in einer Schleife oder in einer *switch*-Anweisung verwendet werden und hat dasselbe Ergebnis wie ein *goto* auf die nächste Anweisung nach der aktuell umschließenden Schleife bzw. *switch*-Anweisung. Bei verschachtelten Schleifen wird allerdings nur die innerste verlassen wird, nicht jedoch die gesamte Schleife. In einer solchen Situation kann ein *goto* auf ein Schleifenende überschaubarer sein.

Beispiel: Eine verschachtelte Schleife wird durch *break* nicht verlassen:

```

for (int i = 1; i <= s.length(); i++)
    for (int j = 1; j <= gesuchte_Zeichen.Length(); j++)
        if (s[i] == gesuchte_Zeichen[j])
        {
            gefunden = true;
            break; // jetzt wird nur noch die innere
        }         // Schleife verlassen

```

Die Anweisung ***continue*** kann nur in einer Schleife verwendet werden und bewirkt, dass die restlichen Anweisungen des Schleifenkörpers übergangen werden. Anschließend wird die Schleifenbedingung geprüft und der nächste Durchlauf der Schleife durchgeführt. *continue* ist also gleichwertig mit einem Sprung auf das Ende des Schleifenkörpers. *continue* wird aber nur selten benötigt.

Beispiel: Die Anweisungen in der linken und rechten Spalte sind gleichwertig:

```

int i = 0, n = 10, k = 0;   int i = 0, n = 10, k = 0;
while (i<n)                 while (i<n)
{
    k++;                    {
    if (i>3) continue;      k++;
    i++;                   if (i>3);
                          else i++;
    }
}

```

Die einzige Sprunganweisung, auf die man in den wenigsten Programmen verzichten kann, ist die **return-Anweisung**:

```
return expression opt ;
```

Sie kann nur in einer Funktion verwendet werden und beendet ihren Aufruf. Als nächste Anweisung wird die auf den Aufruf folgende Anweisung ausgeführt. Falls nach *return* ein Ausdruck angegeben wird, ist sein Wert der Rückgabewert der Funktion. Er wird durch eine implizite Konversion in den Rückgabebetyp der Funktion umgewandelt. Falls der Datentyp des Funktionswerts *void* ist, darf nach *return* kein Ausdruck angegeben werden.

**Aufgabe:** Hier gibt es (außer nichts zu üben) nichts zu üben.

#### 2.4.15 Assembler-Anweisungen $\Theta$

In ein Visual C++ Programm kann man auch „Assembler“-Anweisungen aufnehmen. Das nächste Beispiel soll nur die Syntax illustrieren und zeigen, wie man gewöhnliche Variable auch in solchen Anweisungen verwenden kann:

```

double rdtsc()
{
    unsigned int x = 0, y = 0;
    __asm {
        rdtsc//write tsc high-order 32 bits into EDX, low -> EAX
        mov x, eax
        mov y, edx
    }
    long long y1 = y;
    return (y1 << 32) + x;
}

```

Diese Funktion gibt den Wert des „time stamp counters“ zurück, der die Anzahl der Taktzyklen seit dem letzten Start des Prozessors enthält. Die Assembler-Anweisung *rdtsc* („read time stamp counter“) schreibt diesen Wert in die Register EAX und EDX. Diese Werte werden durch die beiden *mov*-Anweisungen in die Variablen *x* und *y* kopiert und können anschließend als gewöhnliche Variable verarbeitet werden.

Normalerweise besteht keine Notwendigkeit, Assembler-Anweisungen in einem C++-Programm zu verwenden. Wenn man aber solche Anweisungen verwendet, ist besondere

Vorsicht geboten, da der Compiler nur wenige Prüfungen durchführt. Insbesondere muss man selbst darauf achten, dass die Datentypen der C++-Variablen zu den Datenformaten der Assembler-Anweisungen passen.

## 2.5 Gleitkommatypen

Offensichtlich ist der Wertebereich der Ganzzahldatentypen für viele Anwendungen nicht ausreichend: Die größte darstellbare Zahl ist 10-stellig, außerdem können keine Zahlen mit Nachkommastellen dargestellt werden.

Diese Einschränkungen sind bei den sogenannten Gleitkommatypen wesentlich geringer:

| Datentyp           | Wertebereich (pos./negativ)<br>in Visual Studio    | signifikante Stellen<br>(Genauigkeit) | Größe in<br>Bytes |
|--------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|
| <i>float</i>       | $1,18 \times 10^{-38} \dots 3,40 \times 10^{38}$   | 6                                     | 4                 |
| <i>double</i>      | $2,23 \times 10^{-308} \dots 1,79 \times 10^{308}$ | 15                                    | 8                 |
| <i>long double</i> | wie <i>double</i>                                  | wie <i>double</i>                     | wie <i>double</i> |

Im C++-Standard sind keine expliziten Wertebereiche für diese Datentypen festgelegt. Es wird lediglich verlangt, dass *double* mindestens so genau ist wie *float* und *long double* mindestens so genau wie *double*. Der Wertebereiche von *float*, *double* und *long double* müssen (in dieser Reihenfolge) Teilmengen voneinander sein. Deshalb können die **Wertebereiche, die Genauigkeit und die Größe bei anderen Compilern verschieden** sein. Obwohl *long double* denselben Wertebereich wie *double* hat, ist das ein eigener Datentyp.

Visual C++ verwendet die zum IEEE 754 Standard konformen Gleitkommaformate der Floating Point Unit (FPU), die in allen Pentium-Prozessoren eingebaut ist. Da andere Prozessoren eventuell andere Formate verwenden, sind Binärdateien mit Gleitkommawerten eventuell nicht portabel.

Die Gleitkommatypen werden zusammen mit den Ganzzahldatentypen als **arithmetische Datentypen** bezeichnet. Zusammen mit dem Datentyp *void* fasst man die arithmetischen Datentypen zu den **fundamentalen, vordefinierten oder eingebauten Datentypen** zusammen. Diese werden vom jedem C++-Compiler zur Verfügung gestellt und müssen im Unterschied zu den zusammengesetzten Datentypen (siehe Kapitel 4) nicht explizit definiert werden.

### 2.5.1 Die interne Darstellung von Gleitkommawerten

Gleitkommawerte werden in einem sogenannten **Gleitkommaformat** dargestellt. Ein solches Format verwendet eine vorgegebene **Basis b**, für die in der Praxis nur die Werte 2 (**binäres Gleitkommaformat**) und 10 (**dezimales Gleitkommaformat**) üblich sind. Die **Gleitkomma Darstellung** einer (im mathematischen Sinn) reellen Zahl *r* besteht dann aus 3 ganzzahligen Werten *s* (für das Vorzeichen), *m* (für die sogenannte Mantisse, die auch als **Signifikand** bezeichnet wird) und *e* (dem Exponenten), so dass

$$r = s * m * b^e$$

gilt oder möglichst gut angenähert wird. Um eine eindeutige Darstellung zu erreichen, wird der Exponent in der Regel so gewählt, dass entweder  $0,1 \leq m < 1$  oder  $1 \leq m < b$  gilt. *float*, *double* und *long double* verwenden binäre Gleitkommaformate. Datentypen mit dezimalen Gleitkommaformaten sollen eventuell in Zukunft in den C++-Standard aufgenommen.

Beispiel: Für die Zahl 3,14 im Dezimalsystem ( $b=10$ ) erhält man die Darstellung

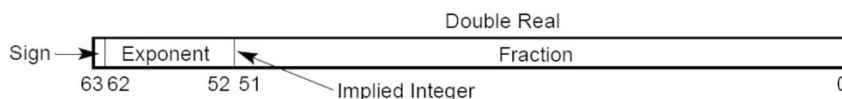
$$3,14 = (+1) * 0,314 * 10^1, \text{ also } s=1, m=0,314 \text{ und } e=1$$

Die Zahl 314 hat dieselbe Mantisse und dasselbe Vorzeichen, aber den Exponenten 3:

$$314 = (+1) * 0,314 * 10^3, \text{ also } s=1, m=0,314 \text{ und } e=3$$

Da mit diesem Datenformat die Zahl Null nicht dargestellt werden kann, wird dafür meist ein spezielles Bitmuster von  $s$ ,  $m$  und  $e$  verwendet.

Visual C++ verwendet die Gleitkommaformate der Floating Point Unit (FPU) der Intel Prozessoren. Beim Datentyp *double* sind die 8 Bytes folgendermaßen auf Vorzeichen, Exponent und Mantisse (Fraction) verteilt:



Der Wert  $v$  der dargestellten Zahl ergibt sich folgendermaßen aus dem Vorzeichen  $s$ , der Fraction  $m$  und dem Exponenten  $e$ :

$$\text{if } 0 < e < 2047, \text{ then } v = (-1)^s * 2^{(e-1023)} * (1.m).$$

$$\text{if } e = 0 \text{ and } m \neq 0, \text{ then } v = (-1)^s * 2^{(-1022)} * (0.m).$$

$$\text{if } e = 0 \text{ and } m = 0, \text{ then } v = (-1)^s * 0.$$

$$\text{if } e = 2047 \text{ and } m = 0, \text{ then } v = (-1)^s * \text{Inf.} // +\infty \text{ und } -\infty$$

$$\text{if } e = 2047 \text{ and } m \neq 0, \text{ then } v \text{ is a NaN.} // \text{not a Number} - \text{keine Zahl}$$

Bei der Bestimmung des binären Gleitkommadarstellung einer reellen Zahl  $r$  geht man ähnlich wie bei Ganzzahlen vor und sucht Koeffizienten  $\dots b_1 b_0 b_{-1} b_{-2} \dots$ , so dass

$$r = \dots b_1 2^1 + b_0 2^0 + b_{-1} 2^{-1} + b_{-2} 2^{-2} \dots$$

gilt. Von diesen Koeffizienten nimmt man ab dem ersten, von Null verschiedenen, so viele für die Mantisse  $m$ , wie diese Bits hat. Die Position der ersten Stelle wird dann durch eine Multiplikation mit  $2^e$  berücksichtigt.

$$\text{Beispiele: } 5_{10} = 1 * 2^2 + 0 * 2^1 + 1 * 2^0 = 1,01_2 * 2^2 \quad (m = 1,01, e = 2)$$

$$0,5_{10} = 1 * 2^{-1} \quad (m = 1,0, e = -1)$$

$$0,1875_{10} = 1 * 2^{-3} + 1 * 2^{-4} = 1,1_2 * 2^{-3} \quad (m = 1,1, e = -3)$$

Ein Algorithmus zur Bestimmung der Koeffizienten  $b_1, b_0, b_{-1}, b_{-2}$  usw. soll am Beispiel der Zahl  $0,1_{10}$  gezeigt werden:

Beispiel:  $0,1_{10} = 0 \cdot 2^{-1} \text{ Rest } 0,1_{10}$   
 $0,1_{10} = 0 \cdot 2^{-2} \text{ Rest } 0,1_{10}$   
 $0,1_{10} = 0 \cdot 2^{-3} \text{ Rest } 0,1_{10}$   
 $0,1_{10} = 1 \cdot 2^{-4} \text{ Rest } // 1/10 - 1/16 = 8/80 - 5/80 = 3/80$   
 $3/80_{10} = 1 \cdot 2^{-5} \text{ Rest } // 3/80 - 1/32 = 1/160 = (1/16) \cdot (1/10)$

Offensichtlich wiederholen sich die Ziffern anschließend, d.h. die Ziffernfolge wird ein nichtabbrechender, periodischer Dezimalbruch:

$$0,1_{10} = 0,0(0011)_2 // \text{Periode in Klammern}$$

$$= 1, (1001)2^{-4} // \text{normiert, so dass die Mantisse mit 1 beginnt}$$

Dieses Beispiel zeigt, dass eine Zahl, die in einem bestimmten Zahlensystem eine abbrechende Dezimalbruchentwicklung hat, in einem anderen Zahlensystem ein nichtabbrechender periodischer Dezimalbruch sein kann. Weitere Beispiele aus anderen Zahlensystemen:

|                    |                                                                                           |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| $1/3_{10} = 0,1_3$ | Der im Dezimalsystem periodische Dezimalbruch $1/3$ ist im System zur Basis 3 abbrechend. |
| $1/7_{10} = 0,1_7$ | Der im Dezimalsystem periodische Dezimalbruch $1/7$ ist im System zur Basis 7 abbrechend. |

Generell gilt: Ein Bruch  $z/n$  lässt sich genau dann als abbrechender Dezimalbruch in einem Zahlensystem zur Basis  $B$  darstellen, wenn alle Primfaktoren des Nenners Teiler von  $B$  sind.

Deshalb können in einem binären Gleitkommaformat alle die reellen Zahlen  $r$  exakt als Gleitkommazahlen dargestellt werden, für die

$$r = \dots b_1 2^1 + b_0 2^0 + b_{-1} 2^{-1} + b_{-2} 2^{-2} \dots$$

gilt und bei denen die Mantisse für die Anzahl der Koeffizienten ausreicht. Alle anderen reellen Zahlen werden entweder nur durch Näherungswerte dargestellt (falls die Mantisse nicht breit genug ist) oder können nicht dargestellt werden, weil der Exponent  $e$  zu klein (Unterlauf, underflow) oder zu groß (Überlauf, overflow) wird.

Bei einem Gleitkommaformat werden also alle reellen Zahlen, die sich erst ab der letzten Stelle der Mantisse unterscheiden, durch dasselbe Bitmuster dargestellt. Deshalb ist die Darstellung einer reellen Zahl im Gleitkommaformat **nur relativ genau, aber nicht immer exakt**. In diesem Punkt unterscheiden sich Gleitkommatentypen grundlegend von den Ganzzahldatentypen: Bei einem Ganzzahldatentyp entspricht jedem Bitmuster genau eine Zahl im Wertebereich, und diese Darstellung ist immer exakt. In der Tabelle auf Seite 111 gibt die Anzahl der **signifikanten Stellen** an, wie viele Stellen einer Dezimalzahl im jeweiligen Gleitkommaformat dargestellt werden können.

Allerdings ist eine Gleitkommadarstellung auch nicht besonders ungenau. In vielen Anwendungen wirkt sich diese Ungenauigkeit beim Rechnen mit Gleitkommazahlen überhaupt nicht aus.

Bei der Subtraktion von fast gleichgroßen Gleitkommazahlen hat das Ergebnis jedoch oft wesentlich weniger richtige Stellen als die Ausgangszahlen:

Beispiel: f1 und f2 unterscheiden sich in der 7. Stelle:

```
float f1 = 1.0000010; // float hat 6 signifikante
float f2 = 1.0000001; // Stellen
float f = f1-f2; // f=8.34465026855469E-7
```

Beim Ergebnis f ist bereits die erste Stelle falsch. Ersetzt man hier *float* durch *double*, erhält man bessere Ergebnisse. Aber auch mit *double* kann der Fehler in der Größenordnung von 10% liegen, wenn sich die beiden Operanden nur auf den letzten signifikanten Stellen unterscheiden.

Solche Rundungsfehler können sich im Lauf einer Folge von Rechnungen so weit aufschaukeln, dass das berechnete Ergebnis deutlich vom tatsächlichen abweicht. Es empfiehlt sich deshalb, die Ergebnisse von Rechnungen mit Gleitkommazahlen immer nachzuprüfen (z.B. eine Probe ins Programm aufzunehmen).

Die bisherigen Ausführungen zeigen insbesondere, dass bei der Addition einer kleinen Zahl zu einer großen Zahl die Summe gleich der großen Zahl sein kann, wenn sich die kleine Zahl erst nach der letzten Stelle der Mantisse auf das Ergebnis auswirkt. Damit kann im Unterschied zu den reellen Zahlen der Mathematik

$$a + x = a$$

sein, ohne dass dabei  $x = 0$  ist.

Außerdem kann das Ergebnis des Ausdrucks  $a + b + c$  davon abhängen, in welcher Reihenfolge der Compiler die Zwischensummen berechnet. Wie das Beispiel (mit  $B = 10$  und einer Mantisse mit 3 Stellen)

$$a = -123,0 \quad b = 123,0 \quad c = 0,456$$

zeigt, gilt  $(a + b) + c = 0,456 \neq 0 = a + (b + c)$ , d.h. das **Assoziativgesetz muss bei der Addition von Gleitkommazahlen nicht gelten**.

## 2.5.2 Der Datentyp von Gleitkommaliteralen

**Gleitkommaliterale** können nach den folgenden Regeln gebildet werden:

*floating-literal:*

*fractional-constant* *exponent-part* *opt* *floating-suffix* *opt*  
*digit-sequence* *exponent-part* *floating-suffix* *opt*

*fractional-constant:*

*digit-sequence* *opt* . *digit-sequence*  
*digit-sequence* .

*exponent-part:*

e *sign* *opt* *digit-sequence*  
E *sign* *opt* *digit-sequence*



*sign*: one of  
+ -

*digit-sequence*:  
*digit*  
*digit-sequence digit*

*floating-suffix*: one of  
f l F L

Der Datentyp eines Gleitkommaliterals ist *double*, solange nicht durch ein Suffix „f“ oder „F“ der Datentyp *float* oder durch „l“ oder „L“ *long double* definiert wird. Da der Kleinbuchstabe l leicht mit der Ziffer 1 verwechselt wird, empfiehlt es sich, immer das große L für *long double* Literale zu verwenden.

Beispiele: Einige Gleitkommaliterale:

```
double d = .1; // d1=0.1
float f1 = 1.234E-38f; // f1==1.234E-38
float f2 = 1.234E-50f; // f2==0
float f3 = 3.4E38f; // f3=3.4E38
float f4 = 3.5E38f; // f4==INF

double d1 = 2.5E-308; // d1==2.5E-308
double d2 = 1.1E-324; // d2==0
double d3 = 1.7E308; // d3==1.7E308
double d4 = 1.8E308; // d4==INF
```

Hier sieht man insbesondere, dass Werte in der Nähe von Null, die außerhalb des darstellbaren Bereichs liegen, auf 0 abgerundet werden. Zu große Werte werden als „INF“ (für „infinity“, unendlich) dargestellt.

Bei Gleitkommaliteralen **muss** man darauf achten, dass die Nachkommastellen mit einem Punkt und **nicht mit** einem **Komma** getrennt werden. Der Ausdruck

```
double d = 3, 1415; // falsch
```

ist in C++ syntaktisch zulässig und wird mit dem sogenannten Kommaoperator ausgewertet. Dabei erhält d den Wert 3 und nicht 3.1415, ohne dass eine Warnung oder Fehlermeldung auf den Schreibfehler hinweist.

### 2.5.3 Standardkonversionen

Wie für die Ganzzahldatentypen sind auch für die Gleitkommatypen **Standardkonversionen** definiert, die der Compiler z.B. in den folgenden Situationen implizit (d.h. automatisch) durchführt:

- Bei der Zuweisung `v=a` eines Ausdrucks `a` des einen an eine Variable `v` eines anderen Datentyps.

- Wenn beim Aufruf einer Funktion für einen Parameter des Datentyps T1 ein Argument des Datentyps T2 eingesetzt wird.

Wie bei Ganzzahldatentypen sollte man mit Initialisierungslisten (siehe Abschnitt 2.3.4) Konversionen unterbinden, die zu einem Verlust an Informationen führen. Einige Beispiele für Standardkonversionen mit Gleitkommatypen:

1. Ein Ganzzahlwert wird exakt in einen Gleitkommatyp konvertiert, außer wenn der Ganzzahlwert mehr signifikante Stellen als der Gleitkommatyp hat. In diesem Fall wird der nächste darstellbare Wert darüber oder darunter ausgewählt.

Beispiel: Ein 32-bit *int*-Wert kann mehr signifikante Stellen haben als *float*. Bei einer Zuweisung ohne Initialisierungslisten kann das zu falschen Werten führen, auf die der Compiler nicht hinweist und die leicht übersehen werden:

```
float f = 1234567891; // f=1234567936, keine Fehlermeldung
```

Mit Initialisierungslisten erhält man eine Fehlermeldung, wenn der Wert nicht dargestellt werden kann:

```
float fi{ 1234567891 }; // Fehler: einschränkende
                        Konvertierung
float fj = { 1234567891 }; // Fehler: einschränkende
                        Konvertierung
float fe = { 1234567 }; // kein Fehler, 1234567 ist nicht
                        zu groß
```

2. Bei der Konvertierung eines Gleitkommawertes in einen Ganzzahltyp werden die Nachkommastellen abgeschnitten und nicht, wie man eventuell erwarten könnte, gerundet.

Beispiele: `int i = 1.4; int j = 1.6; // i=1, j=1`  
`int i = -1.4; int j = -1.6; // i=-1, j=-1`

Falls der Gleitkommawert nicht im Wertebereich des Ganzzahltyps liegt, ist das Ergebnis unbestimmt.

Beispiel: `char c = 12345.0; // c='9'=57`

Mit Initialisierungslisten erhält man bei jeder dieser Zuweisungen eine Fehlermeldung.

Beispiel: `int i = { 1.4 }; int j = { 1.6 }; // Fehler: einschränkende
 Konvertierung`  
`char c = { 12345.0 }; // Fehler: einschränkende Konvertierung`

3. Falls ein Wert eines genaueren in einen ungenaueren Gleitkommatyp konvertiert wird, können Bereichsüberschreitungen auftreten oder signifikante Stellen verloren gehen. Deshalb kann man nach den Zuweisungen

```
double d = 0.1;
float f = d;
double d1 = f;
```

nicht erwarten, dass die Bedingung ( $d==d1$ ) auch erfüllt ist in

```
if (d1 == d)
    cout << "gleich" << endl;
else
    cout << "ungleich" << endl; // Ergebnis: "ungleich"
```

Mit Initialisierungslisten wird ein solches Problem vom Compiler unterbunden:

```
float f = {d}; // Fehler: einschränkende Konvertierung
```

4. Falls ein ungenauerer in einen genaueren Gleitkommatyp konvertiert wird, kann der falsche Eindruck einer höheren Genauigkeit entstehen. So wird z.B. *float*-Wert nach einer Zuweisung an eine die *double*-Variable mit ca. 15 Stellen dargestellt. Dabei sind die letzten Stellen bedeutungslos:

```
float f = 1.234567890123456789;
double d = f; // 1,23456788063049
```

Mit  $f=1.23456789$  erhält man exakt dasselbe Ergebnis. Diese Ungenauigkeiten werden durch Initialisierungslisten nicht abgefangen.

Für Operanden eines arithmetischen Datentyps sind zahlreiche **binäre Operatoren** definiert wie z.B.:

+ (Addition), − (Subtraktion), \* (Multiplikation), / (Division),  
die Vergleichs- oder Gleichheitsoperatoren <, <=, >, >=, ==, !=

Falls bei einem dieser Operatoren der Datentyp der beiden Operanden verschieden ist, werden sie in einen gemeinsamen Datentyp konvertiert, der dann auch bei +, −, \* und / der Datentyp des Ausdrucks ist. Diese Konversionen sind im C++-Standard definiert und werden dort als die „**üblichen arithmetischen Konversionen**“ (usual arithmetic conversions) bezeichnet. Dabei wird in der folgenden Tabelle die Konversion aus der ersten Zeile von oben verwendet, in der die Operanden den entsprechenden Datentyp haben:

| Typ des einen Operanden | Typ des anderen Operanden | Konversion                                                |
|-------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------|
| <i>long double</i>      | beliebig                  | <i>long double</i>                                        |
| <i>double</i>           | beliebig                  | <i>double</i>                                             |
| <i>float</i>            | beliebig                  | <i>float</i>                                              |
| Ganzzahldatentyp        | Ganzzahldatentyp          | übliche arithmetische Konversionen für Ganzzahldatentypen |

Einige Beispiele:

1. In dem Ausdruck

```
1 / 3
```

haben die beiden Operanden 1 und 3 den Datentyp *int*. Deswegen wird die Division als Ganzzahldivision durchgeführt, wobei der Ausdruck den Datentyp *int* und den Wert 0 erhält.

2. Da Gleitkommalliterale ohne Suffix immer den Datentyp *double* haben, wird der Wert der *float*-Variablen *f* in „if (f==0.1)“ in den gemeinsamen Datentyp *double* konvertiert. Deshalb kann man nicht erwarten, dass die Bedingung (f==0.1) in

```
if (f == 0.1)
    cout<< "gleich"<<endl;
else
    cout<< "ungleich"<<endl; // Ergebnis: "ungleich"
```

erfüllt ist. Wenn dagegen in einem solchen Ausdruck keine Datentypen gemischt werden, ist die Bedingung *d==0.1* erfüllt, weil die *double*-Variable *d* dasselbe Bitmuster hat wie der *double*-Wert 0.1:

```
double d = 0.1;
if (d == 0.1)
    cout << "gleich" << endl; //Ergebnis: "gleich"
else
    cout << "ungleich" << endl;
```

Verwendet man auf der rechten Seite einer Zuweisung einen Ausdruck, wird dieser immer zuerst ausgewertet und sein Ergebnis dann der linken Seite zugewiesen. Der Datentyp der rechten Seite ergibt sich dabei allein aus dem Datentyp der beteiligten Operanden und ist unabhängig vom Datentyp der linken Seite. Falls der Datentyp des Ausdrucks nicht dem Datentyp der linken Seite entspricht, wird er durch eine implizite Standardkonversion angepasst.

Diese Art der Ausführung von Zuweisungen gilt für alle Datentypen und wurde auch schon für Ganzzahldatentypen beschrieben. Wie die folgenden Beispiele zeigen, kann das zu Ergebnissen führen, die man auf den ersten Blick vermutlich nicht erwarten würde:

1. Durch die Zuweisung

```
double d = 1 / 3; // d=0
```

erhält *d* den Wert 0, da der Ausdruck *1/3* den Wert 0 hat. Ebenso wird in

```
int i = 2147483647; //INT_MAX-10;
float f = i + i; // f=-22 !!!
```

der Ausdruck `i+i` als Ganzzahlausdruck ausgewertet, wobei `i+i` hier nach einem Überlauf den Wert -22 hat. Diese Ergebnisse überraschen insbesondere deswegen oft, weil der Wertebereich von `d` bzw. `f` für das Ergebnis ausreicht.

## 2. In der Zuweisung

```
bool b = 1.0 / 4; // wird ohne Warnung kompiliert
```

hat die rechte Seite den Datentyp *double* und den Wert 0.25. Da dieser Wert nicht Null ist, erhält `b` den Wert *true*. Weist man diesen Wert einer *int* Variablen zu, erhält sie den Wert 1.

```
double d = b; // d=1;
```

- Wie schon auf Seite 56 (Beispiel 2) gezeigt wurde, wird mit „unsigned int u=0“ der Ausdruck „u-1“ in den Datentyp *unsigned* konvertiert. Dabei wird -1 binär interpretiert, so dass „u-1“ den Wert  $2^{32}-1$  und nicht etwa -1 erhält:

```
unsigned int u = 0;
double d = u - 1; // d=4294967295
```

Falls bei der Auswertung eines Gleitkommaausdrucks ein Überlauf oder eine Division durch 0 stattfindet, bricht der von Visual C++ erzeugte Code das Programm im Unterschied zu manchen anderen Compilern nicht ab. Stattdessen ist das Ergebnis „not a number“ (NaN). Das ist ein spezielles Bitmuster, das keine Gleitkommazahl darstellt.

```
float f = 1E20;
f = f*f; // f= Infinity
int i = 0;
f = f / i; // f= Infinity
```

Sobald ein zum Vergleich herangezogener Wert das **Ergebnis von Rechenoperationen** ist, muss das Ergebnis dieses Vergleichs nicht mehr dem erwarteten Ergebnis entsprechen, da es durch Rundungsfehler verfälscht sein kann:

Beispiel: Diese Anweisungen geben „ungleich“ aus:

```
float f = 0;
for (int i = 1; i <= 2; i++) f = f + 0.1;
if (f == 0.2f) // muss nicht gelten!
    cout << "gleich" << endl;
else
    cout << "ungleich" << endl;
```

Ersetzt man hier *float* durch *double*, erhält man dagegen „gleich“. Bei einer 10fachen Summation der Werte 0.1 und einem Vergleich mit 1 erhält man für alle Gleitkommatypen das Ergebnis „ungleich“.

Es spricht einiges dafür, sich bei allen Zuweisungen von elementaren Datentypen Initialisierungslisten anzugewöhnen. Dann erhält man bei

```
f = { f + 0.1 }; // Fehler: einschränkende Konvertierung
```

eine Fehlermeldung. Ohne Initialisierungsliste wird diese Konvertierung leicht übersehen.

Wenn man aber schon nicht feststellen kann, ob zwei Gleitkommawerte gleich sind, die bei einer exakten Darstellung und Rechnung gleich sein müssten, kann man auch bei einem Vergleich von zwei annähernd gleich großen Werten mit  $>$ ,  $>=$ ,  $<$  und  $<=$  nie sicher sein, ob das Ergebnis in die richtige Richtung ausschlägt.

Beispiel: Diese Anweisungen geben die Meldung „größer“ aus.

```
float f = 0.1;
if (f > 0.1)
    cout << "größer" << endl;
else
    cout << "nicht größer" << endl;
```

Ersetzt man hier *float* durch *double*, erhält man jedoch „nicht größer“.

Deshalb sollte man annähernd gleich große **Gleitkommawerte weder mit dem Operator „==“ noch mit einem anderen Vergleichsoperator vergleichen**. Das gilt für jede Programmiersprache und nicht nur für Visual C++ oder C++.

Die Ungenauigkeit von Gleitkommarechnungen ist dann am geringsten, wenn der Datentyp mit der größten Genauigkeit gewählt wird. Außerdem tritt dann ein Unter- oder Überlauf seltener auf. Es empfiehlt sich daher **immer, den Datentyp *double* zu verwenden**, solange der verfügbare Speicherplatz nicht dagegen spricht. Der Unterschied zwischen 4 Bytes für *float* und 8 Bytes für *double* fällt aber bei dem unter Windows fast unbegrenzten Speicher meist nicht ins Gewicht. Da Gleitkommaliterale ohne Suffix immer den Datentyp *double* haben, ist es am einfachsten, immer *double* zu verwenden.

Die nächste Tabelle enthält die Laufzeiten für die Schleife

```
for (int i = 1; i <= n; i++)
    s = s + d;
```

mit verschiedenen Ganzzahl- und Gleitkommatypen von *i*, *s*, und *d*:

| Benchmarks Visual Studio, Release /O2                                                   |                |                |              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|--------------|
| n=100'000'000                                                                           | VS 2019.5, x64 | VS 2019.4, x86 | VS 2010, x86 |
| 1. <i>float</i> s=0,d=0.1                                                               | 0,12 Sek.      | 0,12 Sek.      | 0,26 Sek.    |
| 2. <i>double</i> s=0,d=0.1                                                              | 0,12 Sek.      | 0,12 Sek.      | 0,09 Sek.    |
| 3. <i>int</i> s=0,d=1                                                                   | 0,03 Sek.      | 0,03 Sek.      | 0,02 Sek.    |
| 4. <i>long long</i> s=0,d=1                                                             | 0,03 Sek.      | 0,08 Sek.      | 0,08 Sek.    |
| 5. Konversionen <i>int</i> --> <i>double</i> ,<br><i>double</i> s = 0; <i>int</i> d= 1; | 0,12 Sek.      | 0,12 Sek.      | 0,08 Sek.    |
| 6. Konversionen <i>double</i> --> <i>int</i> ,<br><i>int</i> s = 0; <i>double</i> i     | 0,51 Sek.      | 0,53 Sek.      | 0,73 Sek.    |
| 7. keine Konversionen, alle <i>double</i><br><i>double</i> s = 0; <i>double</i> i       | 0,15 Sek.      | 0,15 Sek.      | 0,16 Sek.    |

In 1. bis 5. hat die Laufvariable *i* den Datentyp *int*. *s* und *d* haben in 1. bis 4. jeweils denselben Datentyp (in 1. *float*, in 2. *double*, in 3. *int* und in 4. *long long*).

1. und 2. zeigen, dass *float* nicht schneller ist als *double*. Die Laufzeit spricht also nicht gegen den genaueren Datentyp *double*.
  4. zeigt, dass der 64 Bit-Datentyp *long long* bei einem 64 Bit Programm doppelt so schnell ist wie auf einem 32 Bit Datentyp. Wenn der Wertebereich von *int* ausreicht, erhält man damit für alle Prozessoren die kürzeste Laufzeit.
- In 5., 6. und 7. haben *s* und *d* verschiedene Datentypen. Offensichtlich sind Konversionen von *double* in *int* (6.) wesentlich zeitaufwendiger als die von *int* in *double* (5.). In 7. haben alle Variablen den Datentyp *double*: Offensichtlich sind die Gleitkommaoperationen nicht die Ursache für den zusätzlichen Zeitaufwand in 6., sondern nur die Konversionen.

Da die Ergebnisse von Laufzeitmessungen oft überraschend sind, sollte man die Laufzeiten von zeitkritischen Funktionen und ihrer Alternativen immer messen. Allerdings sollte man Laufzeitvergleiche auch nicht überbewerten:

- Bei diesen Benchmarks wurden sehr viele Zahlen addiert, um überhaupt auf messbare Zeiten zu kommen. In vielen Anwendungen hat man viel weniger Rechnungen, so dass man keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Datentypen bemerkt.
- Außerdem können kleinere Änderungen im Programm spürbare Unterschiede zur Folge haben: Bei manchen Datentypen haben die Anweisungen „s+=d“ oder „s=s+0.1“ anstelle von „s=s+d“ Änderungen von 10% zur Folge, bei anderen keine.
- Falls das Programm auf einem Rechner mit einem anderen Prozessor läuft, können sich ganz andere Laufzeiten ergeben. Da man meist sowieso nicht weiß, auf welchem Prozessor ein Programm später läuft, kann man über seine Laufzeit auch keine genauen Aussagen machen.
- Eine Wiederholung desselben Programms ergibt oft Unterschiede von 10%.
- Auch wenn die Laufzeitunterschiede für einen Benutzer nicht von Bedeutung sind: Bei Programmen, die oft ausgeführt werden, kann die schnellere Ausführung mit einem geringeren Stromverbrauch und mit ein klein wenig mehr Energieeffizienz verbunden sein.

### 2.5.4 Mathematische Funktionen

Die C und C++-Standardbibliotheken enthalten zahlreiche **mathematische Funktionen**, die nach

```
#include <cmath>      // C-Bibliothek: #include <math.h>
#include <cstdlib>     // C-Bibliothek: #include <stdlib.h>
using namespace std;  // C-Bibliothek: ohne using ...
```

zur Verfügung stehen. Da die meisten Bibliotheksfunktionen des C-Standards in den C++-Standard übernommen wurden, sind die C- und der C++-Bibliotheken zu großen Teilen identisch. Es gibt aber auch Unterschiede, da beide Bibliotheken unabhängig voneinander erweitert wurden. Obwohl die Verwendung der C-Bibliotheken in C++ sehr verbreitet ist, empfiehlt sich die Verwendung der C++-Bibliotheken, da sie einige Vorteile haben:

```
#include <cmath> // oft besser als <math.h>
using namespace std;
```

Dann sind unter anderem die folgenden Funktionen mit Parametern der Datentypen *float*, *double* und *long double* verfügbar (überladene Funktionen, siehe Abschnitt 7.2). Der Datentyp des Rückgabewertes ist derselbe wie der des Parameters:

**sqrt(x)**: Quadratwurzel von x  
**pow(x, y)**:  $x^y$   
**sin(x)**, **cos(x)**, **tan(x)**: trigonometrische Funktionen Sinus, Cosinus, Tangens. Die Argumente werden im Bogenmaß und nicht in Grad angegeben.  
**acos(x)**, **asin(x)**: Arcusfunktionen von Sinus, Cosinus, Tangens. Falls das Argument nicht im Bereich  $[-1, 1]$  liegt, ist ein Domain-Fehler die Folge.  
**atan(x)**, **atan2(y, x)**: Arcustangens  
**sinh(x)**, **cosh(x)**, **tanh(x)**: Hyperbelfunktionen von Sinus, Cosinus, Tangens  
**exp(x)**, **log(x)**, **log10(x)**:  $e^x$ ,  $\ln(x)$  und Logarithmus zur Basis 10  
**ceil(x)**: der kleinste Ganzzahlwert  $\geq x$  (z.B.  $\text{ceil}(4.5)=5$ ,  $\text{ceil}(-4.5)=-4$ )  
**floor(x)**: der größte Ganzzahlwert  $\leq x$  (z.B.  $\text{floor}(4.5)=4$ ,  $\text{floor}(-4.5)=-5$ )  
**fmod(x, y)**: Gleitkomma-Rest von  $x/y$  (z.B.  $\text{fmod}(2.8, 1.2)=0.4$ )

Den Betrag des Arguments erhält man mit einer der überladenen **abs**-Funktionen aus *math.h* bzw. *cmath* für Argumente eines Gleitkomma- und Ganzzahl-Typs. Die **abs**-Funktion aus *stdlib.h* bzw. *cstdlib* gibt dagegen immer nur einen *int*-Wert zurück:

```
int abs (int x)          // stdlib.h
```

Beispiel: `#include <stdlib.h>`

```
...
double f1 = abs(-2.3); // 2, nicht 2.3 !!!
```

Seit Visual Studio 2019 stehen auch **mathematische Spezialfunktion** zur Verfügung, die vor allem in wissenschaftlichen und technischen Anwendungen benötigt werden:

Laguerre Polynome  
 Beta Funktion

Legendre Funktionen  
 elliptische Integrale



Bessel-Funktionen  
Riemannsche zeta-Funktion

Hermite-Polynome

Bis C++20 enthält Standard-C++ keine mathematischen Konstanten für  $e$ ,  $\pi$  usw. In Visual C++ sind aber einige Konstanten in `<math.h>` enthalten, wie z.B.

```
/* Constants rounded for 21 decimals. */
#define M_E          2.71828182845904523536 // e
#define M_PI         3.14159265358979323846 //  $\pi$ 
#define M_1_PI       0.318309886183790671538 //  $1/\pi$ 
```

Diese stehen aber nur zur Verfügung, wenn man vor dem ersten `#include <cmath>` bzw. `#include <math.h>` das Makro `_USE_MATH_DEFINES` definiert:

```
#define _USE_MATH_DEFINES
#include <cmath>
```

In C++20 wurden einige **mathematische Konstanten** aufgenommen (`#include <numbers>`):

```
namespace std::numbers { // die Werte sind compilerspezifisch
    inline constexpr double e = ...; //
    inline constexpr double pi = ...; //  $\pi$ 
    inline constexpr double ln2 = ...; //  $\ln 2$ 
    inline constexpr double ln10 = ...; //  $\ln 10$ 
    inline constexpr double sqrt2 = ...; //  $\sqrt{2}$ 
    inline constexpr double egamma = ...; // Euler-Mascheroni Konstante  $\gamma$ 
    inline constexpr double phi = ...; // goldener Schnitt Konstante  $\varphi = (1+\sqrt{5})/2$ 
}; // Weitere Konstanten für  $1/\pi$ ,  $1/\sqrt{\pi}$ ,  $\log_2 e$ ,  $\log_{10} e$ ,  $\sqrt{3}$ ,  $1/\sqrt{3}$ 
```

Diese stehen ab Visual Studio 2019, 16.5 zur Verfügung und können so verwendet werden:

```
double x = std::numbers::e;
```

Weitere mathematische Funktionen und Algorithmen sind über verschiedene Header verfügbar (siehe Abschnitt 15.9). So stehen z.B. nach

```
#include <numeric> // oder import std::core; (siehe Abschnitt 2.13)
```

die Funktionen **gcd** und **lcm** zur Verfügung, die den größten gemeinsamen Teiler und das kleinste gemeinsame Vielfache von zwei Ganzzahlwerten zurückgeben.

Beispiel: `constexpr int g = std::gcd(10, 15); // g = 5`  
`constexpr int k = std::lcm(10, 15); // k = 30`

## Aufgaben 2.5

Schreiben Sie die Lösungsfunktionen in eine wie in Abschnitt 1.2.5 beschriebene Header-Datei (z.B. in die schon in Aufgabe 2.4.4 angelegte Header-Datei) und rufen Sie diese auf.

1. Welche der folgenden Anweisungen werden vom Compiler ohne Fehler übersetzt? Welche Werte erhalten die Variablen d1, d2, i1, ..., i6?

```
int j = 10, k = 6;
double x = j, y = 3.14, z = 10;

double d1 = j / k;
double d2 = x / k;
int i1 = j / k;
int i2 = x / k;
int i3 = 3(j + k);
int i4 = j / k / k;
```

2. Mit dem folgenden Experiment kann man einen Näherungswert für die Kreiszahl  $\pi$  bestimmen: Man zeichnet bei Regen in ein Quadrat mit der Seitenlänge 2 einen Kreis mit dem Radius 1 und zählt die Regentropfen, die in das Quadrat bzw. in den Kreis fallen. Bezeichnet man diese Anzahlen als k und n, ist der Quotient k/n ein Näherungswert für den Anteil des Kreises an der Fläche des Quadrates, also  $\pi/4$ .

Dieses Experiment kann man folgendermaßen simulieren: Mit der vordefinierten Funktion **rand()** erhält man eine Zufallszahl zwischen 0 und **RAND\_MAX** (0x7FFFU). Transformiert man zwei aufeinander folgende Zufallswerte in den Bereich zwischen 0 und 1, kann man sie als Koordinaten eines Punktes (x,y) im ersten Quadranten betrachten. Dieser Punkt liegt im Einheitskreis, wenn  $x^2+y^2 < 1$  gilt.

Schreiben Sie eine Funktion *RegentropfenPi*, die einen nach dieser „**Regentropfen-methode**“ bestimmten Näherungswert für  $\pi$  als Funktionswert zurückgibt. Die Anzahl der Versuche soll als Parameter übergeben werden. Geben Sie die Näherungswerte bei 1000 (10000) Wiederholungen aus.

3. Das Produkt der ersten n (n>0) Zahlen

$$f = 1 * 2 * 3 * \dots * n$$

wird auch als **n!** (n Fakultät) bezeichnet. Schreiben Sie eine Funktion **Fakultaet**, die die Fakultät für einen als Argument übergebenen Wert berechnet. Geben Sie die Werte für n=1 bis n=30 aus.

Die Fakultät tritt z.B. beim sogenannten **Problem des Handlungsreisenden** auf: Wenn ein Handlungsreisender n Städte besuchen soll, hat er für die erste Stadt n Möglichkeiten, für die zweite n-1, für die dritte n-2 usw. Um jetzt die kürzeste Route durch diese n Städte zu finden, müssen (zumindest im Prinzip) alle n! Routen miteinander verglichen werden.

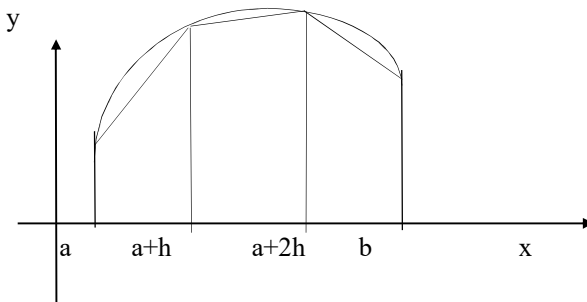
Angenommen, Sie hätten ein Computerprogramm zur Verfügung, das in einer Sekunde 1000000 Routen verglichen kann. Zeigen Sie die Rechenzeit zur Bestimmung der kürzesten Route für n=15 bis n=30 an.

4. Ein **Hypothekendarlehen** über einen Betrag von k Euro mit einem Zinssatz von p% und einer Tilgung von t% sei als Annuitätendarlehen vereinbart. Dabei hat der Schuldner jedes Jahr am Jahresende eine gleich bleibende Rate von (p+t)% des Betrags k zu leisten.

Von dieser konstanten Rate entfallen  $p\%$  der Restschuld auf die Zinsen. Der Rest ist dann die Tilgung, die wegen der im Laufe der Jahre abnehmenden Restschuld jährlich größer wird.

Schreiben Sie eine Funktion, die die Restschuld, Zinsen und Tilgungsraten für jedes Jahr der Laufzeit des Hypothekendarlehens ausgibt. Dieser Funktion sollen  $k$ ,  $p$  und  $t$  als Parameter übergeben werden. Die Zinsen und die Tilgungsraten sollen jeweils am Jahresende fällig werden.

5. Die Fläche zwischen der Funktion  $y=f(x)$  und der  $x$ -Achse im Bereich von  $a$  bis  $b$  kann näherungsweise durch die Summe der Trapezflächen berechnet werden (**Numerische Integration** mit der Trapezregel):



Die Fläche des Trapezes

von  $a$  bis  $a+h$  ist dabei durch  $h \cdot (f(a) + f(a+h))/2$  gegeben,  
die von  $a+h$  bis  $a+2h$  durch  $h \cdot (f(a+h) + f(a+2h))/2$  usw.

Unterteilt man das Intervall von  $a$  bis  $b$  in  $n$  Teile, ist  $h = (b-a)/n$ .

Schreiben Sie eine Funktion *Trapezsumme*, die einen Näherungswert für  $\pi$  als Fläche des Einheitskreises berechnet, indem sie die Trapezflächen unter der Funktion  $\sqrt{1-x^2}$  von 0 bis 1 aufsummiert. Wählen Sie für  $n$  verschiedene Werte, z.B. 100, 1000 und 10000.

## 6. Das Geburtstagsproblem von Mises

Die Wahrscheinlichkeit  $q$ , dass zwei zufällig ausgewählte Personen an verschiedenen Tagen Geburtstag haben, ist

$$q = 364/365$$

Bei drei Personen ist die Wahrscheinlichkeit, dass alle drei an verschiedenen Tagen Geburtstag haben

$$q = (364 \cdot 363) / (365 \cdot 365)$$

Bei  $n$  Personen ist diese Wahrscheinlichkeit

$$q = 364 \cdot 363 \cdot \dots \cdot (364 - n + 2) / 365^{n-1} \quad (n-1 \text{ Faktoren im Zähler und Nenner})$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass von  $n$  Personen mindestens zwei am selben Tag Geburtstag haben, ist dann gegeben durch

$$p = 1 - q$$

- a) Schätzen Sie zuerst, ab wie vielen Personen diese Wahrscheinlichkeit  $> 50\%$  ist.
  - b) Schreiben Sie eine Funktion *Mises*, deren Funktionswert diese Wahrscheinlichkeit für  $n$  Personen ist. Bestimmen Sie dann den kleinsten Wert von  $n$ , für den ihr Funktionswert größer als 0.5 ist. Am einfachsten geben Sie dazu den Funktionswert für verschiedene Werte von  $n$  aus.
  - c) Bei der sogenannten gestreuten Speicherung (Hash-Tabelle) legt man einen Datensatz in einer Tabelle ab, wobei seine Position in der Tabelle aus den Daten berechnet wird. Falls sich dann für zwei verschiedene Datensätze dieselbe Position ergibt, erhält man eine Kollision. Wie viele Tabellenplätze sind notwendig, damit für 23 Datensätze mit zufälligen Positionen die Wahrscheinlichkeit für eine Kollision  $< 50\%$  ist?
7. Schreiben Sie eine Funktion **RoundToInt**, die ein Gleitkomma-Argument auf den nächsthöheren Ganzzahlwert aufrundet, falls seine Nachkommastellen  $\geq 0.5$  sind, und andernfalls abrundet. Diese Funktion soll auch negative Werte richtig runden (z.B. *RoundToInt(3.64)=4*, *RoundToInt(3.14)=3*, *RoundToInt(-3.14)=-3*, *RoundToInt(-3.64)=-4*)
8. Angenommen, die Ausführung der nächsten Schleife dauert eine Sekunde. Schätzen Sie ihre Laufzeit, wenn der Datentyp *double* durch *float* ersetzt wird.

```
double x = 1e8;
while (x > 0)
    --x;
```

## 2.6 Der Debugger, Tests und Ablaufprotokolle

In diesem Abschnitt werden einige einfache Techniken vorgestellt, mit denen man das Ergebnis von Anweisungen untersuchen kann. Diese Ausführungen haben eigentlich nur wenig mit C++ zu tun. Aber sie haben mit Programmieren im Allgemeinen und mit Qualitätssicherung beim Programmieren zu tun, und damit doch auch wieder mit C++.

Diese Techniken werden hier unmittelbar nach der Vorstellung der ersten Sprachelemente behandelt, damit von Anfang an ein Bewusstsein für Programmierlogik und Softwarequalität entwickelt wird. Da sie die Sprachelemente außerdem aus einer Sicht beleuchten, die für viele Anfänger (und auch manchen erfahrenen Praktiker) nicht selbstverständlich ist, können sie zu einem tieferen Verständnis der Sprachelemente beitragen. Einige etwas anspruchsvollere Anwendungen folgen bei verketteten Listen (siehe Abschnitt 6.8 und den Aufgaben dazu).

Bei vielen Programmen (z.B. den Lösungen der Übungsaufgaben aus einem Lehrbuch) ist der Schaden aufgrund eines Programmfehlers nicht besonders hoch. Aber es gibt auch Anwendungen mit hohen Zuverlässigkeitsanforderungen. Würden Sie sich z.B. gerne in ein Flugzeug oder ein Auto mit einem Aufkleber „99,9% safe software inside“ setzen?

Empirische Untersuchungen haben gezeigt, dass ausgelieferte (also getestete) Programme oft eine Fehlerrate haben, die zwischen einem und zehn Fehlern pro 1000 Zeilen Quelltext liegt. Der Coverity Scan Open Source Report 2013 bezeichnet eine Fehlerrate von einem Fehler pro 1000 Zeilen Programmtext als akzeptierten Industriestandard. Da die meisten Beispiele in diesem Buch kürzer als 10 Zeilen sind, mag es als übertrieben erscheinen, derart einfache und offensichtlich richtige Programme so gründlich zu untersuchen. Deshalb geht es in hier vor allem um die Techniken und weniger um die Korrektheit der Beispiele.

### 2.6.1 Der Debugger

Da bisher noch niemand das fehlerfreie Programmieren erfunden hat, kommt es immer wieder vor, dass sich ein Programm einfach nicht so verhält, wie man sich das gedacht hat. Ein Fehler, der die Ursache für ein falsches Programmergebnis ist (eine Abweichung von der Spezifikation), wird auch als **Bug** (Wanze) bezeichnet, und die Suche nach solchen Fehlern sowie deren Behebung als **Debugging**.

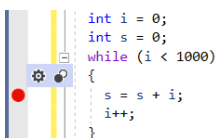
Ein **Debugger** ist ein Werkzeug, das die Suche nach Programmierfehlern erleichtert, indem es z.B. die schrittweise Ausführung eines Programms und die Beobachtung von Variablen während der Laufzeit eines Programms ermöglicht. Da die Suche nach Fehlern oft keineswegs trivial ist, kann man Fehler oft nur so mit vertretbarem Aufwand finden. Der Debugger kann aber auch **für Anfänger** außerordentlich hilfreich sein, da man bei einer schrittweisen Programmausführung sieht, was im Programm tatsächlich passiert.

Wenn man ein Programm für den Debugger kompiliert (mit der Einstellung *Debug* in der Symbolleiste Standard, bzw. *Erstellen|Konfigurations-Manager|Konfiguration der aktuellen Projektmappe|Debug*) und dann in der Entwicklungsumgebung mit *F5* oder *Debuggen|Debuggen Starten* startet, wird es vom integrierten Debugger ausgeführt. Dieser bietet insbesondere die folgenden Möglichkeiten:

#### Haltepunkte (Breakpoints)

Ein Haltepunkt ist eine Zeile im Quelltext, vor deren Ausführung das Programm anhält, wenn es vom Debugger ausgeführt wird. Danach kann man die Werte von Variablen anschauen oder verändern, die nächsten Anweisungen schrittweise mit *F11* oder *F10* ausführen, oder das Programm mit *F5* fortsetzen.

Mit *F9*, oder *Haltepunkt|Haltepunkt einfügen* im Kontextmenü des Editors oder durch Anklicken des linken Rands einer Zeile im Editor wird die Zeile mit dem Cursor ein Haltepunkt. Falls sie bereits ein Haltepunkt war, wird er ausgeschaltet. Eine Zeile, die ein Haltepunkt ist, wird mit einem gefüllten roten Kreis am linken Rand gekennzeichnet.



Mit *Ausführen bis Cursor* im Kontextmenü des Editors, oder dem Anklicken des kleinen Dreiecks am Ende einer Zeile

```
int s = 0; ▶
```

führt der Debugger das Programm bis zu der Zeile aus, in der sich der Cursor befindet.

Mit *Debuggen|Fenster|Haltepunkte* werden alle aktuell gesetzten Haltepunkte angezeigt:

| Haltepunkte                                                                                                                                                  |                  |                          |                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------------------------|---------------------------|
| <div> Neu <span>✕</span> <span>🔍</span> <span>🔊</span> <span>🔄</span> <span>📄</span> <span>🔍</span> Spalten einblenden ▾ Suchen: <input type="text"/> </div> |                  |                          |                           |
| Name                                                                                                                                                         | Bezeichnungen    | Bedingung                | Trefferanzahl             |
| <input checked="" type="checkbox"/> <span>●</span> MeinCpp2019Projekt.cpp, Zeile 20                                                                          | vor der Schleife |                          | Immer halten (momentan 1) |
| <input checked="" type="checkbox"/> <span>●</span> MeinCpp2019Projekt.cpp, Zeile 24                                                                          | kurz vor Ende    | wenn "i>9997" ist "True" | Immer halten (momentan 0) |
| <input type="checkbox"/> <span>○</span> MeinCpp2019Projekt.cpp, Zeile 26                                                                                     |                  |                          | Immer halten (momentan 0) |

Hier können Bedingungen, Durchlaufzähler und Bezeichnungen eingetragen werden. Damit kann das Anhalten an einem Haltepunkt von Bedingungen abhängig gemacht werden. Beispielsweise wird dann in einer Schleife nicht jedes Mal angehalten, sondern erst ab einem bestimmten Wert des Schleifenzählers. Über *Spalten einblenden* kann man weitere Eigenschaften eines Haltepunkts anzeigen.

### Schrittweise Programmausführung:

Mit *F11* oder *Debuggen|Einzelschritt* bzw. *F10* oder *Debuggen|Prozedurschritt* führt der Debugger die nächste Anweisung aus und unterbricht anschließend die Programmausführung. *F11* und *F10* unterscheiden sich nur bei Funktionsaufrufen: Falls die nächste Anweisung ein Funktionsaufruf ist, hält der Debugger mit *F11* bei der ersten Anweisung in der Funktion an. Mit *F10* hält er bei der nächsten Anweisung nach dem Funktionsaufruf an.

### Werte von Variablen anzeigen und verändern

Wenn man den Mauszeiger kurz über einer Variablen stehen lässt, wird ihr Wert in einem kleinen Fenster angezeigt:

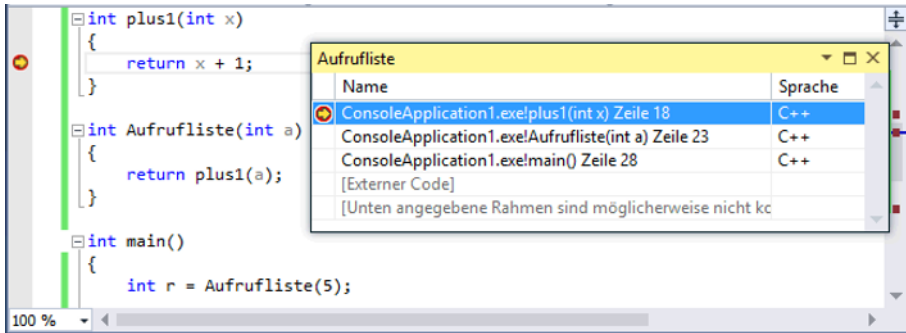
```
int i = 18;
```

🔍 i 18 ⇐

Mit *Debuggen|Fenster|Lokal* werden die **Werte aller lokalen Variablen** der aktuell ausgeführten Funktion angezeigt, und mit *Auto* die der letzten beiden Zeilen. Den **Überwachen** Fenstern kann man einen Ausdruck hinzufügen, indem man ihn im Editor markiert und mit der Maus in das Fenster zieht oder im Kontextmenü des Editors mit *Überwachung hinzufügen*.

In allen diesen Fenstern kann man den **Wert** einer Variablen auch **ändern**. Das ist insbesondere dann nützlich, nachdem man einen Fehler entdeckt hat, durch den eine Variablen einen falschen Wert erhalten hat. Ändert man diesen Wert hier, kann man das Programm fortsetzen, ohne dass man es neu kompilieren und die Debug-Sitzung neu beginnen muss.

Manchmal will man wissen, über welche Funktionsaufrufe man an die aktuelle Programmstelle gekommen ist. Diese Information erhält man im Fenster **Aufrufliste** (*Debuggen|Fenster|Aufrufliste*). Hier wird in der ersten Zeile die zuletzt aufgerufene Funktion angezeigt. Darunter folgen die zuvor aufgerufenen in der Reihenfolge der Aufrufe. Die letzte Zeile enthält die nach dem Start des Programms zuerst aufgerufene Funktion.



Mit einem Doppelklick auf eine Zeile in diesem Fenster wird der Quelltext angezeigt, an der diese Funktion aufgerufen wird.

Einige weitere Anweisungen, die oft nützlich sind:

- Mit *Debuggen|Ausführen bis Rücksprung* (*Umschalt+F5*) wird die aktuelle Funktion bis zu ihrem Ende ausgeführt.
- Falls man vor lauter Blättern in den Quelltexten nicht mehr weiß, welche Anweisung als nächste ausgeführt wird, kann man diese im Kontextmenü des Editors mit **Nächste Anweisung anzeigen** finden.
- Die Ausführung eines Programms kann mit *Debuggen|Alle unterbrechen* unterbrochen werden. Später kann man es dann wieder mit *F5* fortsetzen.
- Die aktuelle Debug-Sitzung kann mit *Debuggen|Debuggen beenden* (*Umschalt+F5*) beendet werden. Alle Halte- und Überwachungspunkte der aktuellen Sitzung bleiben erhalten und können in der nächsten Debug-Sitzung verwendet werden.
- Während einer Debug-Sitzung kann man den **Quelltext** auch **ändern**. Drückt man dann *F5*, *F10* oder *F11*, wird das Programm neu kompiliert und wird im Debugger fortgeführt.
- Mit **Nächste Anweisung festlegen** im Kontextmenü des Editors bzw. durch Ziehen mit der Maus am Anweisungszeiger am linken Rand kann man auch eine andere Anweisung als die nächste Anweisung im Quelltext als nächste Anweisung ausführen. Allerdings kann das auch unerwartete Ergebnisse zur Folge haben, da diese Anweisung dann mit anderen Werten der Prozessorregister ausgeführt wird.

Damit ein Programm vom Debugger ausgeführt werden kann, muss der Compiler zusätzliche Informationen erzeugen und auch etliche Optimierungen unterlassen. Dadurch wird das Programm langsamer. Deshalb kompiliert man ein Programm, das ausgeliefert werden und mit optimaler Geschwindigkeit laufen soll, nach der Konfiguration als **Release** unter *Erstellen|Konfigurations-Manager*.

Es wird oft empfohlen, **jede Funktion im Debugger mindestens einmal schrittweise auszuführen**, damit man gesehen hat, ob sie auch wirklich das tut, was sie tun soll. Dabei

sollte jede Verzweigung mindestens einmal durchlaufen werden, ebenso jede Schleife für die Randwerte sowie für Werte innerhalb und außerhalb der Grenzbereiche.

### Aufgabe 2.6.1

Setzen Sie in Ihrer Lösung der Funktion *zeigeQuersummen* (Aufgabe 2.4.4, 1) einen Haltepunkt. Starten Sie Ihr Programm so, dass die Anweisung mit dem Haltepunkt ausgeführt wird.

- Gehen Sie mit einer schrittweisen Programmausführung in die Funktion *Quersumme*. Zeigen Sie die Variablen *i* und *s* in den Fenstern *Lokal*, *Auto* und *Überwachen* an und führen Sie die Anweisungen schrittweise aus.
- Schauen Sie in der Funktion *Quersumme* den Aufrufstack an.
- Schreiben Sie eine Endlosschleife und unterbrechen Sie das Programm einmal mit *Debuggen|Alle unterbrechen* und einmal mit *Debuggen|Debugging beenden*.

### 2.6.2 Der Debugger – Weitere Möglichkeiten Ø

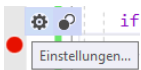
Die im letzten Abschnitt vorgestellten Möglichkeiten des Debuggers sollte jeder Programmierer kennen. Der Debugger bietet aber noch Einiges mehr, das vor allem für Programmierer von größeren und komplexeren Projekten hilfreich ist. Anfänger können diesen Abschnitt übergehen.

Unter *Extras|Optionen|Debugging* können Optionen für den Debugger gesetzt werden.

Mit *Nächste Anweisung festlegen* im Kontextmenü des Editors bzw. durch Ziehen mit der Maus am Anweisungszeiger am linken Rand kann man auch eine andere Anweisung als die nächste Anweisung im Quelltext als nächste Anweisung ausführen. Allerdings kann das auch unerwartete Ergebnisse zur Folge haben, da diese Anweisung dann mit anderen Werten der Prozessorregister ausgeführt wird.

**Kommandozeilenargumente** kann man im Debugger mit *Projekt|Eigenschaften|Konfigurationseigenschaften|Debuggen|Befehlsargumente* übergeben.

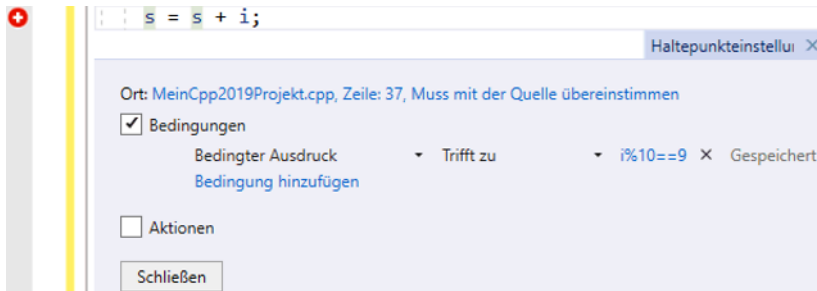
Zu einem **Haltepunkt** kann man unter Einstellungen



(bzw. im Kontextmenü zum Haltepunkt, oder im Fenster *Haltepunkte*) differenzierte **Bedingungen** angeben, die erfüllt sein müssen, damit das Programm anhält. Auf diese Weise kann man z.B. erreichen, dass in einer Schleife nicht jedes Mal, sondern erst beim vorletzten Durchlauf angehalten wird.

- Bedingungen für Haltepunkte können nicht nur Literale, sondern auch Werte von Ausdrücken sein, die mit Operatoren wie *+*, *\**, Funktionsaufrufen usw. gebildet werden.
- Als Bedingung für einen Haltepunkt kann auch festgelegt werden, dass sich der Wert einer Variablen (allgemeiner: Der Wert eines Ausdrucks) ändert:

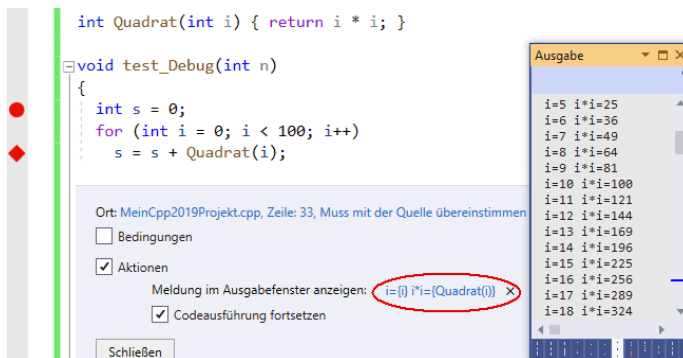




Die Bedingung kann nicht nur ein Variablenwert, sondern auch ein Ausdruck sein.

- Mit einem Haltepunktfilter kann ein Haltepunkt auf bestimmte Prozesse und Threads eingeschränkt werden.
- Haltepunkte können exportiert und wieder geladen werden. Das ist vor allem bei komplexen Fehlern hilfreich, nach denen man mit einer größeren Anzahl von Haltepunkten sucht.
- Haltepunkte können auch in der Aufrufliste oder im Disassembly-Fenster gesetzt werden.

Markiert man in den Einstellungen „Aktionen“, kann man Meldungen definieren, die dann bei jedem Durchlaufen des Haltepunkts im Ausgabefenster (*Ansicht|Ausgabe*) angezeigt werden:

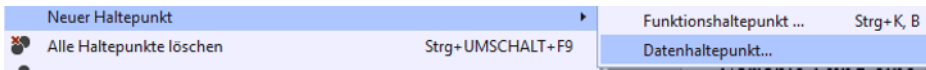


Hier kann man gewöhnlichen Text sowie in geschweiften Klammern Ausdrücke aus dem Programm angeben wie z.B.

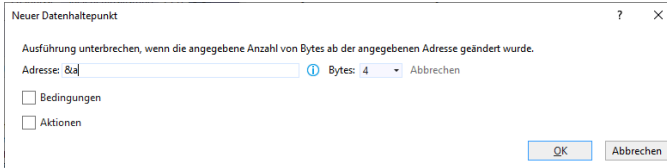
`i={i} i*={Quadrat(i)}`

Markiert man hier noch „Ausführung fortsetzen“, hält das Programm beim Erreichen des Haltepunktes nicht an, sondern gibt nur den Text aus. Damit kann man sehr einfach **Werte** aus einem Programmablauf **protokollieren**. Im Beispiel oben wurde eine Variable *i* und eine Funktion *Quadrat* protokolliert.

Mit *Debuggen|Neuer Haltepunkt|Datenhaltepunkt*

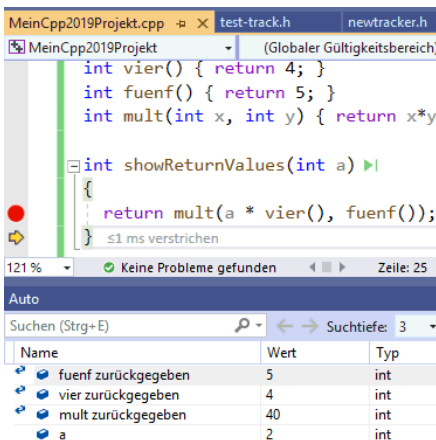


kann ein Daten-Haltepunkt gesetzt werden. Dann muss man eine Adresse und die Anzahl der Bytes angeben:



Wenn sich dann der Wert in diesem Speicherbereich ändert, hält das Programm im Debugger an.

Im *Auto*- und im *Lokal*-Fenster des Debuggers werden auch die **Rückgabewerte** von verschachtelten Funktionsaufrufen angezeigt, wenn man einen Haltepunkt auf den Funktionsaufruf setzt und danach die nächste Anweisung mit *F10* ausführt:



Die *Auto*-, *Lokal*- und *Überwachen*-Fenster haben ein Suchfenster, in dem man den Namen einer Variablen eingeben kann.

In älteren Versionen von Visual Studio musste man die Rückgabewerte einer Funktion einer Variablen zuweisen, wenn man diese im Debugger überprüfen wollte.

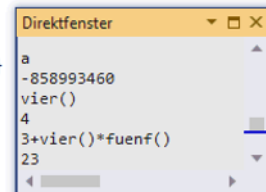
Im sogenannten **Direktfenster** (*Debuggen|Fenster|Direkt*) kann man Werte von Variablen anzeigen, Funktionen aufrufen, Variablen definieren und deren Werte anzeigen usw.

```

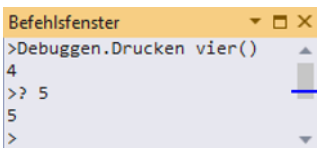
int vier() { return 4; }
int fuenf() { return 5; }
int mult(int x, int y) { return x*y; }

int showReturnValues(int a)
{
    return mult(a * vier(), fuenf());
}

```

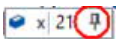


Im **Befehlsfenster** (*Ansicht|Weitere Fenster|Befehlsfenster*) kann man beliebige Visual Studio Befehle eingeben und so insbesondere alle Anweisungen ausführen, die über das Menü von Visual Studio verfügbar sind. Dazu gehören auch die Debug-Befehle, die in der deutschen Version von Visual Studio über den Befehl *Debuggen* verfügbar sind. *Debuggen.Drucken* (in der englischen Version *Debug.Print*, Abkürzung *?*) gibt den Wert eines danach angegebenen Ausdrucks aus:

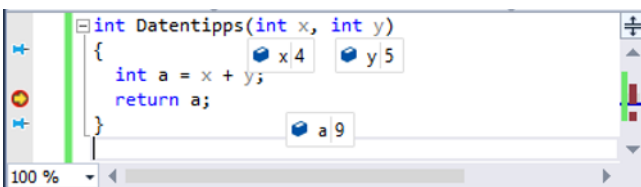


Das Befehlsfenster ist nicht auf Debug-Anweisungen beschränkt. Es ermöglicht eine komplette Steuerung von Visual Studio über Befehle, die als Text eingegeben werden.

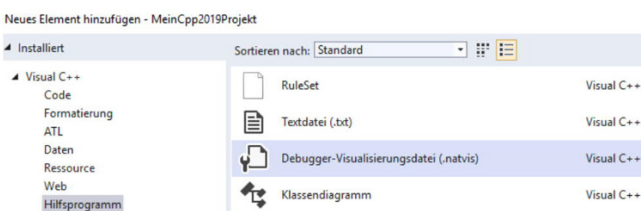
Fährt man mit dem Mauszeiger über eine Variable, nachdem ein Programm bei einem Haltepunkt angehalten wurde, wird der Wert der Variablen in einem sogenannten **Datentipp** angezeigt. Diesen Datentipp kann man im Editor anheften (und auf dem ganzen Desktop verschieben), indem man das Pin-Symbol



anklickt.



Die Darstellung von selbstdefinierten Datentypen im Debugger kann man mit natvis-Dateien steuern. Dazu fügt man dem Projekt im Projektmappen-Explorer eine natvis-Datei hinzu:



Das ist eine XML-Datei, die zunächst etwa so aussieht:

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<AutoVisualizer
xmlns="http://schemas.microsoft.com/vstudio/debugger/natvis/2010">
</AutoVisualizer>
```

Hier kann man im Bereich AutoVisualizer festlegen, wie bestimmte Datentypen wie z.B.

```
struct C2DPunkt { int x, y; };
```

oder `std::vector` im Debugger dargestellt werden. Mit

```
<AutoVisualizer
xmlns="http://schemas.microsoft.com/vstudio/debugger/natvis/2010">
  <Type Name="C2DPunkt*>
    <DisplayString>{ x={x} y={y} }</DisplayString>
  </Type>

  <Type Name="std::vector*>
    <DisplayString>{{ size=_Mylast - _Myfirst} }}</DisplayString>
    <Expand>
      <Item Name="[size]"> _Mylast - _Myfirst</Item>
      <Item Name="[capacity]"> _Myend - _Myfirst</Item>
    </Expand>
  </Type>
</AutoVisualizer>
```

und

```
std::vector<C2DPunkt> v{ {1,2},{3,4},{5,6},{7,8} };
```

erhält man die Darstellung:

| Überwachen 1                       |                      |              |
|------------------------------------|----------------------|--------------|
| Suchen (Strg+E) 🔍 ⏪ ⏩ Suchtiefe: 3 |                      |              |
| Name                               | Wert                 | Typ          |
| ▲ v                                | { size=4 }           | std::vector< |
| ⚙ [capacity]                       | 4                    | int          |
| ⚙ [allocator]                      | allocator            | std::_Comp   |
| ▶ [0]                              | {x=1 y=2 }           | C2DPunkt     |
| ▶ [1]                              | {x=3 y=4 }           | C2DPunkt     |
| ▶ [2]                              | {x=5 y=6 }           | C2DPunkt     |
| ▶ [3]                              | {x=7 y=8 }           | C2DPunkt     |
| ⚙ [Rohdatenansicht]                | {_Mypair=allocator } | std::vector< |

Der Debugger bietet außerdem noch zahlreiche Möglichkeiten, parallel ablaufende Threads und Tasks zu debuggen. Diese werden im Kapitel Multithreading vorgestellt.

2.6.3 CPU Auslastung beobachten mit dem Leistungs-Profiler Ø

Der unter *Debuggen*|*Leistungs-Profiler* verfügbare Leistungs-Profiler startet das aktuelle Projekt und prüft jede Millisekunde, welche Funktion gerade ausgeführt wird. Nach dem Ende des Programms wird dann aus den Trefferzahlen hochgerechnet, wie lange jede Funktion gedauert hat. So kann man Anhaltspunkte über die Laufzeiten der einzelnen Funktionen erhalten.

Fasst man die Anweisungen, deren Laufzeit in Abschnitt 2.5.3 gemessen wurde, in Funktionen wie

```
double sum_double(int n)
{
    double s = 0, d = 0.1;
    for (int i = 1; i <= n; i++)
        s = s + d;
    return s;
}
```

zusammen, und ruft man diese in einer Funktion

```
N_Profiler::Bench_for_numerics()
```

auf, erhält man nach *Debuggen*|*Leistungs-Profiler* etwa diesen Bericht:

| Wichtigste Funktionen                                                          |                         |                          |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Funktionsname                                                                  | Gesamt-CPU [Einheit, %] | Eigen-CPU [Einheit, %] 🔥 |
| N_Profiler::Bench_for_numerics                                                 | 1006 (97,76 %)          | 871 (84,65 %)            |
| N_Profiler::convert_int_to_double                                              | 134 (13,02 %)           | 134 (13,02 %)            |
| [Externer Code]                                                                | 1026 (99,71 %)          | 21 (2,04 %)              |
| [Externer Aufruf] std::basic_ostream<char, std::char_traits<char>>::operator<< | 1 (0,10 %)              | 1 (0,10 %)               |
| [Externer Aufruf] __uncaught_exception                                         | 1 (0,10 %)              | 1 (0,10 %)               |

Nach einem Doppelklick auf die Zeile mit dem Funktionsnamen *Bench\_for\_numerics* erhält man mit etwas Glück (das ist nicht immer so schön dargestellt) eine Übersicht mit dem Zeitaufwand der Funktionsaufrufe:

112 (12,28 %)

116 (12,72 %)

20 (2,19 %)

20 (2,19 %)

110 (12,06 %)

512 (56,14 %)

```
double Bench_for_numerics()
{
    int n = 100000000;
    double s = 0;
    s += sum_float(n);
    s += sum_double(n);
    s += sum_int(n);
    s += sum_long_long(n);
    s += convert_int_to_double(n);
    s += convert_double_to_int(n);
}
```

Diese Werte stimmen weitgehend mit denen von Abschnitt 2.5.3 überein: Die Summation von *float* und *double* dauert etwa gleich lang, die von *int*-Werten ist deutlich schneller, und die Konversion von *int* nach *double* dauert etwa so lang wie alle anderen zusammen.

Führt man die Schleifen aber mit einer geringeren Anzahl von Wiederholungen aus (z.B.  $n/100$  Mal), werden andere Funktionen und auch andere Werte angezeigt:

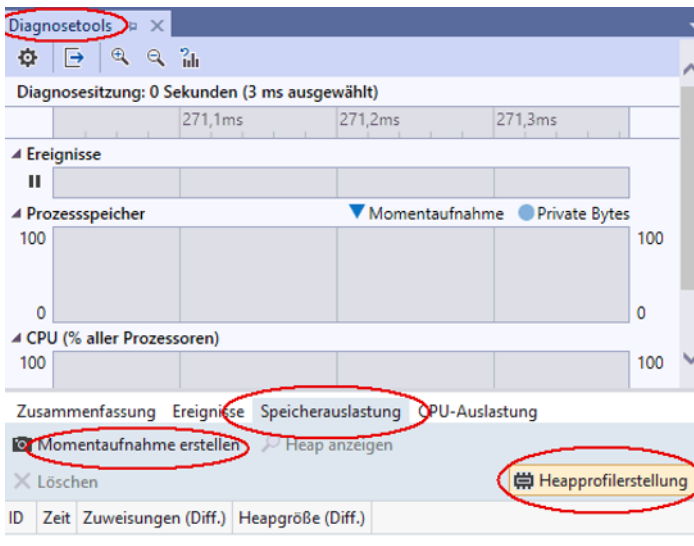
#### Wichtigste Funktionen

| Funktionsname                                                                  | Gesamt-CPU [Einheit, %] | Eigen-CPU [Einheit, %] |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|------------------------|
| N_Profiler::convert_double_to_int                                              | 8 (42,11 %)             | 7 (36,84 %)            |
| [Externer Code]                                                                | 19 (100,00 %)           | 4 (21,05 %)            |
| [Externer Aufruf] std::basic_ostream<char,std::char_traits<char> >::operator<< | 3 (15,79 %)             | 3 (15,79 %)            |
| [Externer Aufruf] common_exit                                                  | 1 (5,26 %)              | 1 (5,26 %)             |
| [Externer Aufruf] std::basic_filebuf<char,std::char_traits<char> >::xsputn     | 1 (5,26 %)              | 1 (5,26 %)             |

Das liegt am Sampling-Verfahren, das nur jede Millisekunde einmal prüft, welche Funktion gerade ausgeführt wird. Deshalb werden Funktionen, die deutlich schneller als eine Millisekunde sind, oft nicht erfasst.

### 2.6.4 Speicherauslastung beobachten mit dem Leistungs-Profiler Θ

Mit den Diagnosetools (*Debuggen|Fenster|Diagnosetools anzeigen*) kann man Momentaufnahmen der aktuellen Speicherauslastung erstellen. Dazu aktiviert man zuerst die Heapprofileerstellung und setzt dann einen Haltepunkt auf jede Programmzeile, in der man die Speicherauslastung beobachten will. Dann startet man das Programm im Debugmodus und klickt nach dem Erreichen eines Haltpunkts *Momentaufnahme erstellen* an:



Wenn man das für die Anweisungen

```
int globalesArray[1000] = {};
int test_MemoryProfiling(int x)
{
    int result = 0;           // 1
    int* dynArray1 = new int[10000]{ x, 3 };
    result = dynArray1[0];    // 2
}
```

```

int* dynArray2 = new int[10000]{ x, 4 };
result += dynArray2[0]; // 3
delete[] dynArray1;      // 4
delete[] dynArray2;      // 5
return result;           // 6
}

```

bei jeder Zeile mit den Kommentaren gemacht hat, erhält man diese Momentaufnahmen:

Zusammenfassung

Ereignisse

Speicherauslastung

CPU-Auslastung

 Momentaufnahme erstellen

 Heap anzeigen

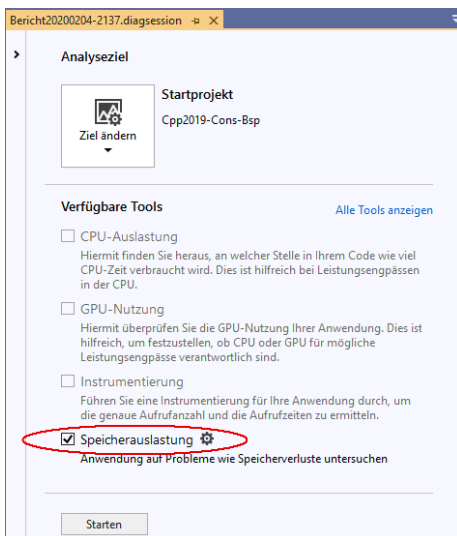
 Löschen

 Heapprofilerstellung

| ID | Zeit   | Zuweisungen (Diff.) | Heapgröße (Diff.)       |  |
|----|--------|---------------------|-------------------------|--|
| 1  | 0,07 s | 436 ( n/v )         | 93,16 KB ( n/v )        |  |
| 2  | 0,07 s | 437 (+1 ↑)          | 132,26 KB (+39,10 KB ↑) |  |
| 3  | 0,07 s | 438 (+1 ↑)          | 171,35 KB (+39,10 KB ↑) |  |
| 4  | 0,07 s | 438 (+0)            | 171,35 KB (+0,00 KB)    |  |
| 5  | 0,07 s | 437 (-1 ↓)          | 132,26 KB (-39,10 KB ↓) |  |
| 6  | 0,07 s | 436 (-1 ↓)          | 93,16 KB (-39,10 KB ↓)  |  |

Klickt man auf eine dieser Momentaufnahmen, erhält man detailliertere Informationen:

Man kann auch bei einer **Release-Version** die Speicherauslastung überwachen. Dazu wählt man unter *Debuggen*|*Leistungsprofiler starten*:



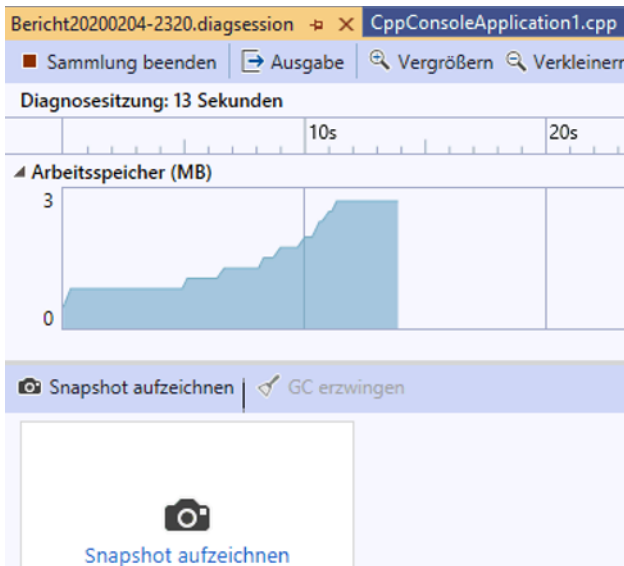
Drückt man nach dem Start der Anweisungen

```

int doNotOptimizeAway = 0;
while (true) // absichtlich eine Endlosschleife
{
    std::cout << "*";
    char* pc = new char[100000];
    if (getchar() == 'q')
        break;
    doNotOptimizeAway += pc[0]; // ohne eine Verwendung
} // von pc wird das vom Compiler wegoptimiert
std::cout << doNotOptimizeAway << std::endl;

```

mehrfach eine Taste, sieht man, wie jedes Mal die Speicherauslastung zunimmt:



Klickt man auf Sammlung beenden, kann man die Momentaufnahmen nach dem Ende des Programms genauer anschauen.

### 2.6.5 Systematisches Testen

Letztendlich ist das entscheidende Kriterium für die Korrektheit eines Programms immer das Ergebnis, das man bei seiner Ausführung erhält. Deshalb sollte man jede Funktion oder Anweisungsfolge **immer testen**, indem man sie mit bestimmten Werten ausführt und dann die Ergebnisse prüft. Ein Test setzt eine **präzise und vollständige Beschreibung** der Anforderungen an ein Programm voraus, die für jede Konstellation von Eingangswerten eine eindeutige Prüfung ermöglicht. Eine solche Beschreibung wird auch als **Spezifikation** bezeichnet.

In diesem Abschnitt werden die Grundbegriffe des sogenannten „**White-Box**“-Testens vorgestellt. Dabei analysiert man den Quelltext und versucht, für die zu testenden Anweisungen die Testwerte so zu konstruieren, dass möglichst alle Fehler entdeckt werden. Da ein solcher Test nur die Anweisungen testet, die in einem Programm enthalten sind, kann



man so natürlich keine Fehler entdecken, die sich aufgrund von Anforderungen ergeben, die vergessen wurden. Solche Fehler versucht man mit sogenannten „**Black-Box**“-Tests zu finden, die völlig unabhängig vom Quelltext nur anhand der Spezifikation durchgeführt werden. Für eine ausführliche Darstellung zum Thema Testen wird auf Liggesmeyer (2002), Beizer (1990) und Kaner (1999) verwiesen.

Damit bei einem Test möglichst viele Fehler entdeckt werden, ist eine gewisse Systematik notwendig. Wenn man die Testwerte willkürlich wählt, ist die Gefahr groß, dass Fehler übersehen werden.

Die Werte, mit denen ein einzelner Test durchgeführt wird, bezeichnet man auch als **Testfall**. Ein **Test** besteht aus einem oder mehreren Testfällen. Dafür wird im Folgenden diese **Schreibweise** verwendet:

$\{x=0, y=1; s=1\}$  für einen Test mit den Werten  $x=0$ ,  $y=1$ , bei dem die Variable  $s$  den Wert 1 erhalten soll.

$\{x=0, y=1; s=1 \mid x=2, y=2; s=3\}$  für die beiden Tests  $\{x=0, y=1; s=1\}$  und  $\{x=2, y=2; s=3\}$ , usw.

Falls nur die Testwerte dargestellt werden sollen, aber nicht das Ergebnis, werden die Angaben nach dem Semikolon ausgelassen. Falls die Zuordnung der Werte zu den Variablen unmissverständlich ist, werden die Namen der Variablen wie in  $\{0, 1; 1 \mid 2, 2; 3\}$  ausgelassen.

Die **Mindestanforderung** an systematisch konstruierte Tests ergibt sich daraus, dass jede Anweisung eines Programms falsch sein kann. Deshalb sollte man die Testfälle so wählen, dass **jede Anweisung mindestens einmal** ausgeführt wird.

Anweisungsfolgen mit *if*-Anweisungen sollte man mit solchen Werten testen, dass jede Bedingung sowohl den Wert *true* und *false* erhält. Dadurch wird jeder Zweig mindestens einmal ausgeführt, weshalb man dieses Kriterium auch als **Zweigüberdeckung** (engl. „**branch coverage**“) bezeichnet. Da erfahrungsgemäß bei den Bedingungen leicht Fehler gemacht werden (z.B. „*if* ( $x < 0$ ) ...“ anstelle von „*if* ( $x \leq 0$ ) ...“), wird oft empfohlen, jede Bedingung mit den Randwerten zu testen.

Beispiele: Für eine Zweigüberdeckung der Anweisungsfolge

```
if (x>0) S1; // A)
S2; // S1 und S2 irgendwelche Anweisungen
```

sind zwei Tests notwendig, z.B.  $\{x=0 \mid x=1\}$ . Für die Anweisungsfolge

```
if (x<0) S1; // B)
else S2;
if (y<0) T1;
else T2;
```

erhält man mit den beiden Tests  $\{x=-1, y=-1 \mid x=0, y=0\}$  eine Zweigüberdeckung. Sie führen zur Ausführung von „S1; T1;“ und „S2; T2;“.

Für eine Anweisungsfolge ohne Schleifen und Verzweigungen erreicht man mit einem einzigen Test eine Zweigüberdeckung.

Falls sich eine Bedingung aus Teilbedingungen zusammensetzt, die mit *and* oder *or* verknüpft werden, verlangt man oft, dass jede Teilbedingung mit Werten getestet wird, die das Ergebnis *true* und *false* haben. Dieses Kriterium wird als **Bedingungsüberdeckung** (engl. „**condition coverage**“) bezeichnet.

Beispiel: Mit den Tests  $\{x=-1|x=0|x=10\}$  erhält man eine Bedingungsüberdeckung für

```
if ((x >= 0) && (x<10)) S;
```

Mit den Tests  $\{x=-1|x=0|x=9|x=10\}$  erhält man eine Bedingungsüberdeckung und einen Test aller Randwerte.

Alle bisher vorgestellten Testkriterien sind intuitiv naheliegende Minimalanforderungen an Tests. Sie berücksichtigen aber alle nicht, dass manche Fehler nur bei bestimmten Kombinationen von Anweisungen (Programmpfaden) auftreten und bei anderen nicht. So werden z.B. die Pfade „S1; T2“ und „S2; T1“ in der Anweisungsfolge B) mit der angegebenen Bedingungsüberdeckung nicht getestet. Falls diese Pfade zu Fehlern führen, werden sie nicht entdeckt. Deshalb sollte ein Test immer zur Ausführung aller Programmpfade führen. Dieses Kriterium wird als **Pfadüberdeckung** (engl. „**path coverage**“) bezeichnet.

Beispiel: Für die Anweisungsfolge B) des vorletzten Beispiels sind für eine Pfadüberdeckung 4 Tests notwendig, z.B.

$$\{x=-1, y=-1|x=0, y=0|x=-1, y=0|x=0, y=-1\}$$

Bei einem Programm mit  $n$  aufeinander folgenden *if*-Anweisungen sind für eine Pfadüberdeckung  $2^n$  Tests notwendig.

Die Funktion

```
void f1(int n)
{
    for (int i = 0; i < n; i++)
        S; // irgendeine Anweisung
}
```

kann mit jedem Wert aus dem Wertebereich von *int* aufgerufen werden. Für jeden Wert von  $n$  führt das zu einem anderen Programmpfad:

```
; // für n<=0 keine Anweisung
S; // für n=1
S; S; // für n=2
usw.
```

Wenn *int* 2,147,483,647 Werte  $\geq 0$  annehmen kann, sind für *f1* 2,147,483,647 Programmpfade möglich.

## Die Schleife

```

for (int i = 0; i < n; i++)
    if (x < 0) S1
    else S2;

```

kann zu  $1+2^1+2^2+\dots+2^{2,147,483,647}$  Pfaden führen:

$n \leq 0$ : ein Pfad „“ (keine Anweisung)  
 $n=1$ : die 2 Pfade „S1;“ oder „S2;“,  
 $n=2$ : die 4 Pfade „S1;S1;“, „S1;S2;“, „S2;S1;“, „S2;S2;“,  
 $n=3$ : die 8 Pfade „S1;S1;S1;“, „S1;S1;S2;“, „S1;S2;S1;“, „S1;S2;S2;“,  
 „S2;S1;S1;“, „S2;S1;S2;“, „S2;S2;S1;“, „S2;S2;S2;“

Dieses Beispiel zeigt, dass das Pfadüberdeckungskriterium oft zu einer so großen Anzahl von Testfällen führt, dass es praktisch nicht mehr durchführbar ist. Hier kommt man an die Grenze des Testens.

Die Aufgaben eines Programms werden oft in Teilaufgaben aufgeteilt, die von **Funktionen** gelöst werden. Die Funktionen sollen dann mit den Argumenten ein bestimmtes Ergebnis erzielen. Deswegen ist es meist empfehlenswert, **ganze Funktionen** als Gegenstand des Testens zu betrachten, und nicht einzelne Anweisungen. Zum Testen einer Funktion wählt man für die Testfälle Argumente, die beim Aufruf der Funktion zu einer Pfad- oder Bedingungsüberdeckung für ihre Anweisungen führen.

Da diese Kriterien bei **Funktionen mit Schleifen** aber oft zu aufwendig sind, sollte man sie mindestens mit solchen Argumenten testen, dass jede Schleife

- FT-0: nie durchgeführt wird,
- FT-1: genau einmal durchgeführt wird,
- FT-n: mehr als einmal durchgeführt wird,
- FT-p: dass jeder Pfad innerhalb und außerhalb einer Schleife einmal durchgeführt wird, und
- FT-t: mit einer typischen Anzahl von Wiederholungen durchgeführt wird.

Beispiel: Für die Funktionen (*pwr* soll für  $n \geq 0$   $x^n$  und sonst  $-1$  zurückgeben)

|                                                                                                                            |                                                                                                                                                                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <pre> int QS(int n) { // wie Quadratsumme   int s = 0;   for (int i=1; i&lt;=n; i++)     s = s + i*i;   return s; } </pre> | <pre> int pwr(int x, int n) {   int p = 1;   if (n &lt; 0) p = -1;   while (n &gt; 0)   {     if (n%2==1) p=p*x;     n = n / 2;     x = x*x;   }   return p; } </pre> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

werden diese Kriterien mit den folgenden Argumenten erfüllt:

*QS*: FT-0 mit  $n=0$ ; FT-1 mit  $n=1$ ; FT- $n$  z.B. mit  $n=2$ ; FT- $p$  erfordert keine Tests, da keine *if*-Anweisungen

Diese Kriterien werden durch diese Testfälle abgedeckt:  $\{n=0; QS=0 \mid n=1; QS=1 \mid n=2; QS=5\}$

*pwr*: FT-0 mit  $n=0$ ; FT-1 mit  $n=1$ ; FT- $n$  mit  $n=5$ ; FT- $p$  zum ersten *if* mit  $n=-1$  und  $n=0$ , und zum zweiten *if* mit einem geraden und ungeraden  $n>0$ ; FT- $t$ : z.B. 3 oder 4 Schleifenwiederholungen

Diese Kriterien werden durch diese Testfälle abgedeckt:

$\{x=2, n=-1; pwr=-1 \mid x=2, n=0; pwr=1 \mid x=2, n=1; pwr=2\}$   
 $\{x=2, n=2; pwr=-1 \mid x=2, n=5; pwr=32 \mid x=2, n=8; pwr=128\}$

Für 3 und 4 Wiederholungen sind Werte von  $n$  im Bereich  $4 \leq n \leq 7$  und  $8 \leq n \leq 15$  notwendig.

Das sind aber nur Mindestanforderungen. **Oft** sind **weitere Tests** notwendig. Beispielsweise würde mit diesen drei Tests bei der Funktion *Fibonacci* (Aufgabe 2.4.6, 2.) der Überlauf für größere Argumente als 46 nicht entdeckt. Deshalb benötigt man für die Wahl guter Testfälle auch ein Verständnis der Aufgabe und ein Gefühl für die möglichen Probleme.

Mindestens genauso wichtig wie eine systematische Vorgehensweise ist aber die **mentale Einstellung**: Beim Entwurf von Testdaten sollte man sich immer das Ziel setzen, Fehler zu finden. Ein Test, der nur zeigen soll, dass ein Programm funktioniert und der alle kritischen Fälle auslöst, ist wertlos. Nehmen Sie sich bei einem Test immer vor, das Programm zu knacken. Stellen Sie sich dazu doch einfach vor, es wäre von einem Kollegen geschrieben, den Sie überhaupt nicht leiden können, und dem Sie es schon immer mal zeigen wollten.

Größere Programme können umfangreiche Tests erfordern. Nach Cem Kaner ([http://www.testingeducation.org/course\\_notes/hoffman\\_doug/test\\_automation/auto8.pdf](http://www.testingeducation.org/course_notes/hoffman_doug/test_automation/auto8.pdf)) hat Windows NT (Version 4) 6 Millionen Zeilen Quelltext und 12 Millionen Zeilen Testanweisungen.

### Aufgaben 2.6.5

1. Entwerfen Sie für die Funktionen in a) bis f) systematische Tests. Geben Sie für jeden Testfall das erwartete Ergebnis an. Die Tests mit diesen Testdaten werden dann in Aufgabe 2.6.6 durchgeführt und sind hier nicht notwendig.

- a) `int Quersumme(int n) // (Aufgabe 2.4.4, 2.)`
- ```
{
    if (n < 0) n = -n; // berücksichtige negative n
    int s = 0;
    while (n > 0)
    {
        s = s + n % 10;
        n = n / 10;
    }
    return s;
}
```
- b) `int Fibonacci(int n) // (Aufgabe 2.4.4, 3.)`
- ```
{
    int f = 0, x = 0, y = 1;
    for (int i = 0; i < n; i++)
    {
        x = y;
        y = f;
        f = x + y;
    }
    return f;
}
```
- c) `bool istPrim(int n) // (Aufgabe 2.4.4, 5. a)`
- ```
{
    if (n < 2) return false;
    else if (n == 2) return true;
    else
    {
        for (int i = 2; i*i <= n; i++)
            if (n%i == 0) return false;
        return true;
    }
}
```
- d) `int Goldbach(int n) // (Aufgabe 2.4.4, 5. c)`
- ```
{
    if ((n<4) || (n % 2 == 1)) return -1;
    else
    {
        int k = 0;
        for (int i = 2; i <= n / 2; i++)
            if (istPrim(i) && istPrim(n - i)) k++;
        return k;
    }
}
```

- e) `int` zeigePythagTripel(`int` n) // (Aufgabe 2.4.4, 6.)
- ```
{
    int nt = 0; // Anzahl der gefundenen Tripel
    for (int a = 1; a < n; a++)
        for (int b = a; b < n; b++)
            for (int c = b; c*c <= a*a + b*b; c++)
                if (a*a + b*b == c*c)
                {
                    cout << "a=" << a << " b=" << b << " c=" << c << endl;
                    nt++;
                }
    return nt;
}
```
- f) `int` f3nplus1(`int` n) // (Aufgabe 2.4.4, 7.)
- ```
{
    if (n <= 1) return 0;
    int m = 0;
    while (n != 1)
    {
        m++;
        if (n % 2 == 1) n = 3 * n + 1;
        else n = n / 2;
    }
    return m;
}
```
- g) Wie viele Tests sind für einen vollständigen Pfadtest bei den Funktionen in a) bis d) notwendig, wenn der Datentyp `int` Werte im Bereich -2,147,483,648 ... 2,147,483,647 annehmen kann?

2. Geben Sie einige Beispiele für Funktionen an, die nicht oder zumindest nicht so einfach, wie in Aufgabe 1 automatisch getestet werden können.

### 2.6.6 Unittests: Funktionen, die Funktionen testen

Tests sollten **immer dokumentiert** werden, damit man auch noch später überprüfen kann, ob das Programm wirklich umfassend getestet wurde. Außerdem spart man den Aufwand für die Suche nach Testfällen, wenn nach einer Programmänderung oder einer neuen Version des Compilers ein erneuter Test notwendig wird.

Dazu sollte man die Testprotokolle aber nicht nur auf ein Blatt Papier schreiben und in einem Ordner abheften. **Testfunktionen**, die Tests durchführen, sind eine bessere Dokumentation. Ein einfacher Aufruf ermöglicht dann später die Wiederholung der Tests mit einem geringen Zeitaufwand.

Die Grundidee für solche Testfunktionen ist einfach: Sie machen nichts anderes, als wenn man ein Programm mit einer zu testenden Funktion aufruft. Anstatt zu schauen, ob der erwartete Wert am Bildschirm angezeigt wird, prüft die Testfunktion, ob die zu testende Funktion den gewünschten Wert hat:

Mit einer globalen Variablen wie

```
int FailCount = 0;
```

und einer Testfunktion wie

```
void Unittests_Quersumme_0()
{ // teste die Testfälle {0;0|123;6|1000;1}
  if (Quersumme(0) != 0) FailCount++;
  if (Quersumme(123) != 6) FailCount++;
  if (Quersumme(1000) != 1) FailCount++;
}
```

kann man testen, ob eine Funktion (hier *Quersumme*) die gewünschten Funktionswerte hat. Nach dem Aufruf dieser Funktion kann man mit der Variablen *FailCount* prüfen, ob Fehler aufgetreten sind:

```
void Summary()
{
  if (FailCount == 0)
    cout << "All tests passed" << endl;
  else
    cout << FailCount << " Tests failed" << endl;
}
```

Üblicherweise prüft man die Gleichheit der Werte in einer Funktion mit dem Namen *AreEqual*. Dieser kann man auch noch eine Meldung übergeben, die bei einem Fehler anzeigt, wo der Fehler entstanden ist.

```
void AreEqual(int expected, int actual, std::string msg)
{ // einen Testfall testen
  if (expected != actual)
  {
    FailCount++;
    cout << "Test failed: erwartet=<" << expected <<
          "> tatsächlich=<" << actual << "> " << msg << endl;
  }
}
```

Die Testfunktion von oben ersetzt man dann durch diese Funktion:

```
void Unittests_Quersumme_1()
{ // ein einfacher Test für die Funktion Quersumme
  // Reihenfolge der Parameter bei Microsoft: expected, actual
  AreEqual(0, Quersumme(0), " Quersumme(0)");
  AreEqual(6, Quersumme(123), " Quersumme(123)");
  AreEqual(1, Quersumme(1000), " Quersumme(1000)");
}
```

Wenn alle Testfunktionen wie hier das Ergebnis der Tests mitzählen, kann man mit einer Funktion wie *test\_All* anzeigen, ob alle Tests erfolgreich waren:

```

void test_All()
{
    int FailCount = 0;
    Unittests_Quersumme();
    // Unittests_AndereFunktionen();
    // weitere Tests
    Summary(); // Testzusammenfassung ausgeben
}

```

Solche Testfunktionen haben gegenüber manuellen Tests wichtige **Vorteile**:

- Da der Aufruf einer Testfunktion auch bei einem umfangreichen Programm oft nur den Bruchteil einer Sekunde dauert, kann man so ohne großen Aufwand nach Programmänderungen alle Tests wiederholen und sicherstellen, dass sich keine Fehler eingeschlichen haben. Mit manuellen Tests ist das meist viel aufwendiger und oft nicht praktikabel.
- Der Aufwand für das erstmalige Erstellen einer Testfunktion ist zwar größer als bei manuellen Tests. Dieser Aufwand wird aber bereits bei wenigen Tests kompensiert.
- Mit der Testfunktion liegt ein Dokument vor, das zeigt, welche Tests durchgeführt wurden.

Automatisierte Tests werden auch als **Unittests** oder **Komponententests** bezeichnet. Sie setzen voraus, dass man alle zu testenden Funktionen so schreibt, dass man sie mit Testfunktionen testen kann. Das erreicht man oft dadurch, dass man das Ergebnis einer Funktion als Wert zurückgibt und nicht nur am Bildschirm ausgibt.

Es gibt einige Bibliotheken, die ähnliche Funktionen wie *AreEqual* zur Verfügung stellen. So sind z.B. die Funktionen *Assert::AreEqual* bei Visual Studio Testprojekten ähnlich aufgebaut wie *AreEqual*. In diesem Buch wird die Datei *SimpleUnitTests.h* verwendet, die im Internet unter

<http://free.rkaiser.de/Cpp/SimpleUnitTests.h>

zur Verfügung steht. Diese enthält im Namensbereich *rk1* eine Klasse *Assert* mit einigen Funktionen wie

```

static void AreEqual(T expected, T actual, string message ) // T: ein
                                                            Datentyp

```

Mit diesen Funktionen kann man für die wichtigsten Datentypen die Gleichheit der Argumente für *expected* und *actual* testen. Diese Funktionen sind für die meisten Übungsaufgaben ausreichend.

Speichert man diese Datei im Verzeichnis *c:\CppUtils*, können die *Assert*-Funktionen nach der *#include*-Anweisung

```

#include "c:\CppUtils\SimpleUnitTests.h"

```

wie in



```

void Unittests_Quersumme()
{
    // ein einfacher Test für die Funktion Quersumme
    rk1::Assert::Init("Unittests Quersumme"); // Tests initialisieren
    rk1::Assert::AreEqual(0, Quersumme(0), " Quersumme(0)");
    rk1::Assert::AreEqual(6, Quersumme(123), " Quersumme(123)");
    rk1::Assert::AreEqual(1, Quersumme(1000), " Quersumme(1000)");
    rk1::Assert::Summary(); // Testzusammenfassung ausgeben
}

```

verwendet werden. Vor der Ausführung der Tests müssen die internen Zähler zurückgesetzt werden. Das erreicht man durch einen Aufruf der Funktion

```
static void Init()
```

Übergibt man *Init* einen String, wird dieser vor den Ergebnissen angezeigt. Mit

```
static void Summary()
```

wird eine kurze Zusammenfassung der Testergebnisse seit dem letzten *Init* ausgegeben.

Mehrere Tests können dann wie in der Funktion *Unittests\_AlleFunktionen* zusammengefasst werden:

```

void Unittests_AlleFunktionen()
{
    Unittests_Quersumme();
    // weitere Tests
}

```

Mit den beiden Anweisungen *#ifdef \_DEBUG* und *#endif* erreicht man, dass diese Tests nur bei einer Debug-Version, aber nicht bei einer Release-Version (*Erstellen|Konfigurations-Manager*, Konfiguration der aktuellen Projektmappe: *Release* aktivieren) durchgeführt werden. Ruft man die Unittests beim Start der *main*-Funktion auf, werden diese bei jedem Start des Programms ausgeführt:

```

int main()
{
    #ifdef _DEBUG
        Unittests_AlleFunktionen();
    #endif
}

```

Die Lösungen zu diesem Buch enthalten zahlreiche Unittests. Die meisten dieser Testfunktionen haben „Unittest“ im Namen.

Tests sind nicht nur nützlich um zu prüfen, ob eine zuvor geschriebene Funktion die gewünschten Ergebnisse hat. Der Entwurf von Testfällen und Testfunktionen kann zu einem besseren Verständnis der Aufgabenstellung beitragen und dadurch bei der Suche nach einer Lösung hilfreich sein. Kent Beck (1999) empfiehlt unter dem Stichwort „**Test-First Programming**“, zuerst Testfälle und Testfunktionen zu entwerfen, und zwar noch bevor man

mit der Programmierung der Lösung beginnt. Ausgehend von einfachen Testfällen werden dann erste einfache Lösungsvarianten entworfen, die nur diese einfachen Testfälle erfüllen. Diese Schritte werden dann mit verfeinerten Testdaten so lange wiederholt, bis man eine hinreichend allgemeingültige Lösung hat.

### Aufgaben 2.6.6

1. Schreiben Sie Testfunktionen für die Testfälle aus Aufgabe 2.6.5, 1. (für jede Teilaufgabe eine eigene Funktion) und rufen Sie diese in einer Funktion (z.B. mit dem Namen *Unittests\_2\_6*) auf. Nehmen Sie diese Funktionen in das Projekt mit Ihren Lösungen der Aufgabe 2.4.4 auf und rufen Sie *Unittests\_2\_6* auf. Sie können die Funktionen aus *SimpleUnitTests.h* verwenden.

Falls Sie diese Aufgaben im Rahmen einer Gruppe (z.B. in einer Vorlesung) bearbeiten, kann es zur Qualität Ihrer Tests beitragen, wenn Sie nicht Ihre eigenen Funktionen testen, sondern die eines anderen Teilnehmers. Tauschen Sie dazu Ihre Lösungen aus und testen Sie sich gegenseitig.

### 2.6.7 Ablaufprotokolle

Es gibt viele Programme, die für die meisten Werte der beteiligten Variablen das gewünschte Ergebnis haben, aber für bestimmte Werte falsche Ergebnisse liefern oder abstürzen. Solche Fehler werden beim Testen oft deshalb übersehen, weil die Anzahl der notwendigen Testfälle so groß ist, dass sie überhaupt nicht mit einem vertretbaren Aufwand durchgeführt werden können. Deshalb sind für einen allgemeingültigen Nachweis der Korrektheit eines Programms Techniken notwendig, die von speziellen Werten der beteiligten Variablen unabhängig sind.

Ein **Programm** besteht aus Variablen und Anweisungen. Die **Variablen** stellen einen Wert des Datentyps der Variablen dar, und dieser **Wert** kann durch die **Anweisungen** verändert werden.

Die Auswirkung der Anweisungen auf die Variablen kann man sich auf einfache Weise mit einem **Ablaufprotokoll** veranschaulichen. Dazu stellt man den Wert der Variablen nach jeder Anweisung in einer Tabelle dar, deren Zeilen die Anweisungen und deren Spalten die Variablen enthalten. Jede Zeile eines Ablaufprotokolls ist eine **Momentaufnahme** der Werte der protokollierten Variablen. Ein Ablaufprotokoll wird auch als Schreibtischtest bezeichnet und hat Ähnlichkeiten mit einer schrittweisen Ausführung des Programms im Debugger, bei der die Werte der Variablen beobachtet werden. Während man aber im Debugger immer nur die gerade aktuellen Werte der Variablen sieht, zeigt ein Ablaufprotokoll, wie diese Werte entstehen.

Ein Anfänger gewinnt durch die Erstellung eines Ablaufprotokolls oft ein besseres Verständnis für das Ergebnis von Anweisungen als wenn er nur die Anweisungen in ein Programm schreibt und das dann laufen lässt. Eine einfache Verallgemeinerung dieser Technik (die in Abschnitt 2.6.8 vorgestellte **symbolische Ausführung**) ermöglicht es, das Ergebnis von Anweisungen allgemein nachzuweisen.

Beispiele: 1. Für die Anweisungen

```
int h, x = 1, y = 2;
h = x;
x = y;
y = h;
```

erhält man das Ablaufprotokoll:

|                 | <b><i>h</i></b> | <b><i>x</i></b> | <b><i>y</i></b> |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| int h, x=1, y=2 | ?               | 1               | 2               |
| h=x;            | 1               |                 |                 |
| x=y;            |                 | 2               |                 |
| y=h;            |                 |                 | 1               |

2. Für die Anweisungen

```
int x = 1, y = 2;
x = x + y;
y = x - y;
x = x - y;
```

erhält man das Ablaufprotokoll:

|               | <b><i>x</i></b> | <b><i>y</i></b> |
|---------------|-----------------|-----------------|
| int x=1, y=2; | 1               | 2               |
| x=x+y;        | 3               |                 |
| y=x-y;        |                 | 1               |
| x=x-y;        | 2               |                 |

Bei einer ***if*-Anweisung** werden in Abhängigkeit von der Bedingung verschiedene Anweisungen ausgeführt. Wenn sie keinen *else*-Zweig hat, wird keine Anweisung ausgeführt wenn die Bedingung nicht erfüllt ist.

Beispiel: Für die *if*-Anweisung

```
if (n % 2 == 1) n = 3 * n + 1;
else n = n / 2;
```

erhält man mit n=17 das Ablaufprotokoll

| <b><i>n</i></b> | <b><i>n%2==1</i></b> |
|-----------------|----------------------|
| 17              |                      |
| if (n%2==1)     | true                 |
| n=3*n+1;        | 52                   |
| else            |                      |
| n=n/2;          |                      |

Mit  $n=18$  wird der *else*-Zweig ausgeführt:

| <i>n</i>    | <i>n%2==1</i> |
|-------------|---------------|
| 18          |               |
| if (n%2==1) | <i>false</i>  |
| n=3*n+1;    |               |
| else        |               |
| n=n/2;      | 9             |

Für die *if*-Anweisung

```
if (n < 0) n = -n;
```

wird mit  $n=1$  keine Anweisung ausgeführt:

| <i>n</i>      | <i>n&lt;0</i> |
|---------------|---------------|
| 1             |               |
| if (n<0) n=-n | <i>false</i>  |

Die Parameter einer Funktion sind lokale Variablen, die beim Aufruf der Funktion mit den Argumenten initialisiert werden. Ein Ablaufprotokoll für eine **Funktion** enthält deshalb neben den übrigen lokalen Variablen auch die Parameter, deren Anfangswert die Argumente sind.

Beispiel: Ein Aufruf *sum(17,18)* der Funktion

```
int sum(int x, int y)
{
    int s = x + y;
    return s;
}
```

kann deshalb durch dieses Ablaufprotokoll dargestellt werden:

| <i>x</i>   | <i>y</i> | <i>s</i> |
|------------|----------|----------|
| 17         | 18       |          |
| int s=x+y; |          | 35       |
| return s;  |          |          |

Manchmal ist es übersichtlicher, wenn man den durch *return* zurückgegebenen Wert in einer extra Spalte darstellt:

| <i>x</i>    | <i>y</i> | <i>result</i> |
|-------------|----------|---------------|
| 17          | 18       |               |
| return x+y; |          | 35            |

**Aufgaben 2.6.7**

1. Erstellen Sie für die Anweisungen der folgenden Funktionen Ablaufprotokolle mit den jeweils angegebenen Argumenten:

a) *Fakultaet(4)* (Aufgabe 2.5, 3.)

```
int Fakultaet(int n)
{
    int f = 1;
    for (int i = 2; i <= n; i++)
        f = f*i;
    return f;
}
```

b) *Fibonacci(4)* (Aufgabe 2.4.4, 3.)

```
int Fibonacci(int n)
{
    int f = 0, x = 0, y = 1;
    for (int i = 0; i < n; i++)
    {
        x = y;
        y = f;
        f = x + y;
    }
    return f;
}
```

c) *Quersumme(289)* (Aufgabe 2.4.4, 2.)

```
int Quersumme(int n)
{
    if (n < 0) n = -n; // berücksichtige negative n
    int s = 0;
    while (n > 0)
    {
        s = s + n % 10;
        n = n / 10;
    }
    return s;
}
```

d) *istPrim(17)* und *istPrim(18)* (Aufgabe 2.4.4, 5.)

```

bool istPrim(int n)
{
    if (n < 2) return false;
    else if (n == 2) return true;
    else
    {
        for (int i = 2; i*i <= n; i++)
            if (n%i == 0) return false;
        return true;
    }
}

```

e) *Mises(3)* (Aufgabe 2.5, 6.)

```

double Mises(int n)
{
    double q = 1;
    for (int i = 0; i < n - 1; i++)
        q = q*(364 - i) / 365;
    return 1 - q; // 0 für n<=1
}

```

## 2. Das Ablaufprotokoll für die Anweisungen

```

int x = 1, y = 2;
x = x + y;
y = x - y;
x = x - y;

```

hat gezeigt, dass sie die Werte der Variablen  $x$  und  $y$  vertauschen. Gilt das nur für die Werte  $x=1$  und  $y=2$ , oder auch für beliebige Werte von  $x$  und  $y$ ? Falls Sie sich nicht sicher sind, brechen Sie diese Aufgabe ab. Wir kommen später darauf zurück.

### 2.6.8 Symbolische Ablaufprotokolle

Die meisten Funktionen haben Parameter, für die beim Aufruf beliebige Argumente des Parametertyps übergeben werden können. Um zu testen, ob eine Funktion für alle möglichen Werte der Argumente das gewünschte Ergebnis hat, müsste man sie mit allen möglichen Argumenten aufrufen. Das ist aber meist mit einem Aufwand verbunden, der sich nicht vertreten lässt.

Alle diese Tests lassen sich oft durch ein einziges symbolisches Ablaufprotokoll ersetzen. Dabei verwendet man im Unterschied zu einem gewöhnlichen Ablaufprotokoll keinen konkreten Wert, sondern ein Symbol wie z.B.  $x_0$  oder  $x_0$  für den Wert einer Variablen  $x$ . Dafür wird die Bezeichnung „symbolisches Ablaufprotokoll“ verwendet, obwohl das Adjektiv „symbolisch“ für ein Ablaufprotokoll eigentlich nicht angemessen ist. Aber die präziseren Bezeichnungen wie „symbolische Ausführung“ (engl. „symbolic execution“) oder „Ablaufprotokoll mit symbolischen Werten“ sind oft etwas unhandlich. Ein symbolisches Ablaufprotokoll kann auch als **verallgemeinerter Test** betrachtet werden.

Beispiel: 1. Für die Funktion *vertausche* aus Abschnitt 2.4.5 erhält man das symbolische Ablaufprotokoll, das mit Kommentaren in den Quelltext übernommen wurde:

```
void vertausche(int& x, int& y)
{
    // h    x    y
    //      x0   y0
    int h = x; // x0
    x = y;     // y0
    y = h;     //      x0
} // x==y0 and y==x0
```

Der letzte Kommentar fasst das Ergebnis des Ablaufprotokolls zusammen: Die Variable *x* hat den ursprünglichen Wert von *y* und *y* den ursprünglichen Wert von *x*.

Da die Parameter von *vertausche* Referenzparameter sind, werden beim Aufruf dieser Funktion ihre Anweisungen direkt mit den Argumenten ausgeführt. Deshalb führt der Aufruf dieser Funktion dazu, dass die Werte ihrer Argumente vertauscht werden, was durch die folgenden Kommentare zum Ausdruck gebracht werden soll:

```
// a==a0, b==b0
vertausche(a, b);
// a==b0, b==a0
```

Hier wurden die Werte von *a* und *b* vor dem Aufruf mit *a0* und *b0* bezeichnet, um das Ergebnis des Funktionsaufrufs darstellen zu können.

2. Für die Funktion mit den Anweisungen aus Aufgabe 2.6.7, 2. erhält man das symbolische Ablaufprotokoll:

```
void vertausche1(int& x, int& y)
{
    // x    y
    //      x0   y0
    x = x + y; // x0+y0
    y = x - y; // (x0+y0)-y0=x0
    x = x - y; // (x0+y0)-x0=y0
} // x==y0 && y==x0
```

Offensichtlich vertauscht auch diese Funktion die Werte ihrer Argumente, falls die Zwischenergebnisse nicht zu einem Überlauf führen. Dieses Ergebnis wird ohne ein symbolisches Ablaufprotokoll meist nicht so leicht gesehen.

Einen allgemeingültigen Nachweis, dass ein Programm oder eine Folge von Anweisungen bestimmte Anforderungen (eine Spezifikation) erfüllt, bezeichnet man auch als **Programmverifikation**. Eine Programmverifikation unterscheidet sich von einem **Test** dadurch, dass ein Test das Ergebnis von Anweisungen nur für die getesteten Werte nachweist. Deshalb kann man mit einem Test nur die Gegenwart von Fehlern entdecken, aber niemals die Korrektheit eines Programms nachweisen (Dijkstra, 1972), außer man testet es für alle möglichen Werte. Die letzten beiden Beispiele zeigen, dass symbolische

Ablaufprotokolle eine Technik zur Programmverifikation sind, die oft keinen größeren Aufwand erfordert als ein Ablaufprotokoll mit konkreten Werten.

Symbolische Ablaufprotokolle stehen in einer ähnlichen Relation zu einem Test wie die Algebra zur Arithmetik: In der Algebra werden wie bei einer symbolischen Ausführung Symbole für Werte verwendet, während bei einem Test wie in der Arithmetik konkrete Werte verwendet werden.

In diesem Zusammenhang sind die folgenden Begriffe üblich:

- Eine Bedingung  $P$ , die vor der Ausführung einer Anweisung  $S$  vorausgesetzt wird, bezeichnet man als **Vorbedingung**. Wenn dann nach der Ausführung von  $S$  eine Bedingung  $Q$  gilt, bezeichnet man diese als **Nachbedingung**. Solche Bedingungen werden oft als Kommentare in einem Programm dokumentiert:

```
// P
S
// Q
```

$P$ ,  $S$  und  $Q$  stehen meist für konkrete Bedingungen oder Anweisungen, wie z.B.

```
// x==x0 and y==y0
x = x + y;
y = x - y;
x = x - y;
// x==y0 and y==x0
```

Hier besagt die Vorbedingung lediglich, dass der Wert von  $x$  mit  $x_0$  und der von  $y$  mit  $y_0$  bezeichnet wird.

- Falls eine Nachbedingung unabhängig von irgendwelchen Vorbedingungen (also immer) erzielt wird, verwendet man **true** als Vorbedingung:

```
// true
if (x < 0) x = -x;
// x>=0
```

- Für Bedingungen  $P$  und  $Q$  und eine Anweisung  $S$  bedeutet die Schreibweise

```
// P
S
// Q
```

dass nach der Ausführung von  $S$  die Nachbedingung  $Q$  gilt, wenn vor der Ausführung von  $S$  die Vorbedingung  $P$  erfüllt war. Es wird keine Aussage über die Nachbedingung gemacht, falls die Vorbedingung nicht erfüllt war.

- Eine Bedingung, die sowohl vor als auch nach der Ausführung einer Anweisung gilt, wird als **Invariante** bezeichnet, da sie durch die Anweisung nicht verändert wird. Eine Invariante ist also gleichzeitig Vor- und Nachbedingung:



```
// P
S
// P
```

Im **C++-Standard** sind für zahlreiche Funktionen Vor- und Nachbedingungen (preconditions und postconditions) angegeben. Die Vorbedingungen beschreiben die Voraussetzungen, die beim Aufruf der Funktion erfüllt sein müssen. Die Nachbedingungen beschreiben das Ergebnis der Funktion.

Mit einem **symbolischen Ablaufprotokoll** kann man nicht nur die Werte von Variablen untersuchen und nachweisen, sondern auch **allgemeine Beziehungen** zwischen Variablen.

Beispiel: Wenn vor der Ausführung der Anweisungen

```
r = r - y;
q = q + 1;
```

die Vorbedingung

$$q*y + r = x, \text{ d.h. } q_0*y_0 + r_0 = x_0$$

gilt, dann sieht man mit dem symbolischen Ablaufprotokoll

|            |                                   |                   |                |
|------------|-----------------------------------|-------------------|----------------|
|            | // r                              | q                 | y              |
|            | // r <sub>0</sub>                 | q <sub>0</sub>    | y <sub>0</sub> |
| r = r - y; | // r <sub>0</sub> -y <sub>0</sub> |                   |                |
| q = q + 1; | //                                | q <sub>0</sub> +1 |                |

dass diese Beziehung auch noch nach der Ausführung dieser Anweisungen gilt:

$$\begin{aligned}
 q*y + r &= (q_0 + 1)*y_0 + (r_0 - y_0) \\
 &= q_0*y_0 + y_0 + r_0 - y_0 \\
 &= q_0*y_0 + r_0 = x_0 = x
 \end{aligned}$$

Solche Beziehungen werden üblicherweise als Kommentar dokumentiert, da ein Leser des Programms allein aus den Anweisungen kaum auf die Idee kommen würde, die Vorbedingung vorauszusetzen und daraus die Nachbedingung abzuleiten.

```
// q*y + r = x
r = r - y;
q = q + 1;
// q*y + r = x
```

Beispiel: Wenn vor der Ausführung der Anweisungen

```
s = s + i*i;
i++;
```

die Vorbedingung

$$s == 0 + 1^2 + \dots + (i-1)^2$$

gilt, dann sieht man mit dem symbolischen Ablaufprotokoll

```

          //: i      s
          //: i0      0+1^2+...+(i0-1)^2
s = s + i*i; //: {0+1^2+...+(i0-1)^2}+i0^2
i++;        //: i0+1
          ///: i==i0+1 ==> i0==i-1
          ///: d.h. s==0+1^2+...+(i-1)^2

```

dass diese Beziehung auch noch nach der Ausführung dieser Anweisungen gilt. Dieses Ablaufprotokoll zeigt, dass die Anweisung

```
s = s + i*i;
```

aus der Bedingung

$$s == 0 + 1^2 + \dots + (i-1)^2$$

zunächst die Bedingung

$$s == 0 + 1^2 + \dots + (i-1)^2 + i^2$$

herstellt. Da  $i$  jedoch anschließend erhöht wird, gilt die ursprüngliche Bedingung

$$s == 0 + 1^2 + \dots + (i-1)^2$$

anschließend wieder.

Selbstverständlich erwartet niemand von Ihnen, dass Sie allein aus den Anweisungen der letzten Beispiele die gefundenen Beziehungen herleiten, da diese Anweisungen ohne jeden Kontext „vom Himmel gefallen“ sind. Wenn man dagegen ein Programm schreibt, will man ja immer ein bestimmtes Ergebnis erzielen. Dieses Ergebnis ist die Nachbedingung, und diese versucht man dann, aus den gegebenen Vorbedingungen herzuleiten.

### Aufgaben 2.6.8

1. Versuchen Sie, aus den Vorbedingungen in a) bis e) die als Nachbedingung angegebenen Beziehungen herzuleiten.

a)  $n$  ganzzahlig und ungerade,  $p$ ,  $x$ ,  $u$  und  $v$  Ganzzahl- oder Gleitkommatentypen

```

// p*x^n = u^v
p = p*x;
n = n / 2;
x = x*x;
// p*x^n = u^v

```

b)  $n$  ganzzahlig und gerade,  $p$ ,  $x$ ,  $u$  und  $v$  Ganzzahl- oder Gleitkommatentypen

```
//  $p \cdot x^n = u^v$ 
n = n / 2;
x = x * x;
//  $p \cdot x^n = u^v$ 
```

- c) i ganzzahlig, s Gleitkomma- oder Ganzzahldatentyp

```
// s = 1 + 2 + ... + i, d.h. s ist die Summe der ersten i
//      Zahlen
i = i + 1;
s = s + i;
// s = 1 + 2 + ... + i
```

- d) i ganzzahlig, s Gleitkomma- oder Ganzzahldatentyp

```
// s = 1*1 + 2*2 + ... + i*i, d.h. s ist die Summe der ersten
//      i Quadratzahlen
i = i + 1;
s = s + i*i;
// s = 1*1 + 2*2 + ... + i*i
```

- e) i ganzzahlig, s Gleitkomma- oder Ganzzahldatentyp

```
// s = 1*1 + 2*2 + ... + i*i
s = s + i*i;
i = i + 1;
// s = 1*1 + 2*2 + ... + i*i
```

2. Wie immer, wenn man mehrere Verfahren zur Auswahl hat, stellt sich die Frage: „Welches ist besser?“. Vergleichen Sie die beiden Funktionen *vertausche* und *vertauschel*.

## 2.7 Konstanten

Bei der Definition einer Variablen kann man zusammen mit dem Datentyp oder *auto* das Schlüsselwort **const** oder **constexpr** angeben. Dadurch wird eine **Konstante** definiert. Eine Konstante kann im Wesentlichen wie eine Variable verwendet werden. Allerdings verweigert der Compiler jede Veränderung ihres Wertes (z.B. in einer Zuweisung). Da eine Konstante nach ihrer Definition nicht mehr verändert werden kann, muss sie bei ihrer Definition initialisiert werden.

Beispiel: Durch jede der folgenden Definitionen wird eine Konstante definiert. Dabei kann man jedes *const* auch durch *constexpr* ersetzen. Eine Konstante kann nicht nur mit Literalen initialisiert werden

```
const int Min = 0, Max { 100 }; // beide konstant
const auto Pi = 3.1415926535897932; // wie const double ...
```

sondern auch mit konstanten Ausdrücken

```
const int AnzahlBuchstaben = 'Z' - 'A' + 1;
const int maxZeichenProSpalte = 4 + 4 + 2; // ####.####
const int maxSpalten = { 80 / maxZeichenProSpalte };
const int maxZeilen = 80 - 20;
const int maxZeichen = maxSpalten*maxZeilen;
```

Nach diesen Definitionen führen die folgenden Anweisungen zu einer Fehlermeldung des Compilers:

```
Max++; // Fehler: muss ein änderbarer L-Wert sein
Pi = 3.41; // Fehler: muss ein änderbarer L-Wert sein
```

Wie bei Variablen können auch Initialisierungslisten verwendet werden:

```
const char c{ 1000 }; // Fehler: einschränkende Konvertierung
```

Falls eine Konstante bei ihrer Definition nicht initialisiert wird, erzeugt der Compiler eine Fehlermeldung:

```
const int x; // Fehler: Konstantes Objekt muss initialisiert
              werden
```

In den C++ Core Guidelines wird empfohlen, globale Variablen zu vermeiden. Es spricht aber nichts gegen globale Konstanten.

Bei einer Codeanalyse mit den C++ Core Guidelines (siehe Abschnitt 2.13) wird empfohlen, eine Variable, die nach ihrer Definition nicht mehr verändert wird, mit *const* zu kennzeichnen:

```
int x = 1; // warning C26496 : Die Variable "x" wird nur einmal
           zugewiesen, markieren Sie sie als const (con.4).
```

Eine Konstante ist oft ein Name für ein **Literal** (z.B. 0, 100, 3.14... usw.) und wird dann auch als **symbolische Konstante** bezeichnet. **Symbolische Konstanten** sind insbesondere dann **vorteilhaft**, wenn derselbe Wert an mehreren Stellen in einem Programm benutzt wird. Sobald eine Änderung dieses Wertes notwendig ist, reicht eine einzige Änderung der Konstanten. Verwendet man dagegen Literale, muss jede Stelle im Programm gesucht und geändert werden, an der das Literal vorkommt.

Beispiel: Will man alle Elemente des Arrays (siehe Abschnitt 4.2)

```
int a[100];
```

durchlaufen, ist das mit einer *for*-Schleife mit der Obergrenze <100 oder <=99 möglich. Nach einer Änderung der Elementanzahl muss man alle Stellen im Programm suchen und ändern, an denen diese verwendet wird. Definiert man die Anzahl der Arrayelemente dagegen als symbolische Konstante

```
const int Max = 100; // oder constexpr int Max = 100;
```

und verwendet man diese als Obergrenze für den Index, muss nur die symbolische Konstante geändert werden:

```
for (int i = 0; i < Max; i++)
```

Bei einem `std::array` (siehe Abschnitt 4.2.2)

```
std::array<int, 100> a;
```

ist eine symbolische Konstante für die Anzahl der Array-Elemente aber nicht notwendig, da man diese Anzahl über die Elementfunktion *size* erhält:

```
for (int i = 0; i < a.size(), i++)
```

Eine Konstante kann nicht nur in Anweisungen, sondern wie in

```
const int maxSpalten = { 80 / maxZeichenProSpalte };
```

auch zur Definition von anderen Konstanten verwendet werden. Hier berechnet der Compiler den Wert von *maxSpalten* aus den Werten rechten Seite. Übergibt man solche Berechnungen an den Compiler, lassen sich mühsame und eventuell fehlerhafte eigene Rechnungen sparen. Insbesondere sieht man solchen Ausdrücken direkt an, wie ihr Wert zustande kommt.

Symbolische Konstanten können auch dann sinnvoll sein, wenn eine Konstante nur ein einziges Mal verwendet wird: Gibt man der symbolischen Konstanten einen aussagekräftigen Namen, kann das die Verständlichkeit erleichtern und einen Kommentar ersparen.

Beispiel: Die Bedeutung einer „magischen Zahl“ wie 123 in

```
if (Fehler == 123) ...
```

ist oft nicht unmittelbar klar. Verwendet man dagegen einen aussagekräftigen Namen für diesen Wert, ergibt sich die Bedeutung sofort:

```
const int Fehler_Datei_nicht_gefunden = 123;
...
if (Fehler == Fehler_Datei_nicht_gefunden) ...
```

Hier ist aber ein Aufzählungstyp (siehe Abschnitt 5.2.3) oft noch besser als eine Ganzzahl-Konstante geeignet.

Der Compiler kann eine Konstante durch ihren Wert ersetzen, wenn dieser zum Zeitpunkt der Kompilation bekannt ist. Für eine solche Konstante muss dann kein Speicherplatz reserviert werden. Der erzeugte Code ist derselbe, wie wenn anstelle der Konstanten ihr Wert im Programm stehen würde.

Beispiel: Visual C++ erzeugt mit den Konstanten von oben für diese Anweisungen denselben Code wie für die als Kommentar angegebenen Anweisungen:

```
int i = max;           // int i=100;
int j = max*(maxZeilen + 20); // int j=8000;
```

Viele Variable, Parameter usw. werden nicht verändert. Dann kann man sie sowohl als Konstante als auch als gewöhnliche Variable definieren. Eine Konstante hat oft Vorteile:

- Man sieht dann bereits an der Definition, dass sie nicht verändert wird.
- Bei *const* Referenz- oder Zeigerparametern (siehe Abschnitte 2.4.5 und 7.4) sieht man, dass bei einem Aufruf das Argument bzw. der dereferenzierte Zeiger nicht verändert wird.
- Der Compiler erzeugt eine Fehlermeldung, wenn man „==“ und „!=“ in einer Bedingung verwechselt.

```
void f(const int x)      void f(int x)
{
  if (x = 1)... // Fehler  if (x=1)... // kein Fehler
```

Für nicht konstante Variablen sind entsprechende Aussagen oft nur nach einer aufwendigen Lektüre des Quelltextes möglich. Deshalb wird generell empfohlen, alle Variablen, Parameter usw. als konstant zu definieren, wenn sie nicht verändert werden. Sie werden dann auch als **const-korrekt** bezeichnet.

Ein angenehmer Nebeneffekt von Konstanten ist, dass ihr Wert von Intellisense angezeigt wird:

```
const int c1 = 10;
const int c2 = 10 * c1;
```



Das Schlüsselwort *const* bzw. *constexpr* kann vor oder nach dem Datentyp stehen. Die nächste Definition ist zwar nicht verbreitet, aber gleichwertig zu der von oben:

```
int const Max = 100; // gleichwertig zu const int Max=100
```

### 2.7.1 Laufzeitkonstanten mit *const*

Eine mit *const* definierte Konstante kann man nicht nur mit einer Konstanten initialisieren, sondern auch mit einer Variablen:

```
int i = 17;
const int c = i;
```

Das gilt auch mit einem Datentyp, der wie *std::string* (siehe Kapitel 3) eine Klasse ist:

```
string s0 = "s0 ist eine Variable";
const string s1 = s0;
const string s2 = "char*-Literal"; // Konstruktor erzeugt Variable
```

Da der Wert einer Variablen für den Compiler erst zur Laufzeit (und nicht schon während der Kompilation) bekannt ist, bezeichnet man eine solche Konstante auch als **Laufzeitkonstante** oder als „**konstante Variable**“. Eine solche Variable kann nach der Definition nicht mehr verändert werden.

### 2.7.2 Compilezeit-Konstanten mit *constexpr*

Im Unterschied zu einer mit *const* definierten Konstanten muss eine mit *constexpr* definierte mit einem Wert initialisiert werden, den der Compiler kennt. Sie wird deshalb auch als **Compilezeit-Konstante** bezeichnet.

Beispiel: Mit *const* kann einer Konstanten der Wert einer Variablen zugewiesen werden.  
Das ist mit *constexpr* nicht möglich:

```
void Konstanten(const int n)
{
    const int Max = n;
    constexpr int MaxL = n; // Fehler: n ist keine Konstante
    constexpr int Maxim = 1000;
    int a[Maxim];
}
```

Selbstverständlich kann *constexpr* auch mit *auto* kombiniert werden:

```
constexpr auto Max = 100;
```

Es ist aber nicht möglich, *constexpr* bei einem Parameter anzugeben:

```
void Konstanten(constexpr int n) // Fehler: "constexpr" nicht
                                // möglich
```

Wenn eine Klasse wie `std::string` keinen `constexpr`-Konstruktor hat (der eine Compilezeit-Konstante erzeugt), kann man eine Konstante dieses Typs nur mit `const`, aber nicht mit `constexpr` zu definieren:

```
constexpr std::string s = "abc"; //Fehler: muss konstant sein
```

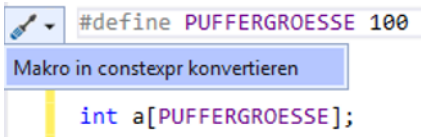
Die Klasse `std::array` hat dagegen einen *constexpr*-Konstruktor:

```
constexpr std::array<int, 100> a = { 1, 2 }; // das geht
```

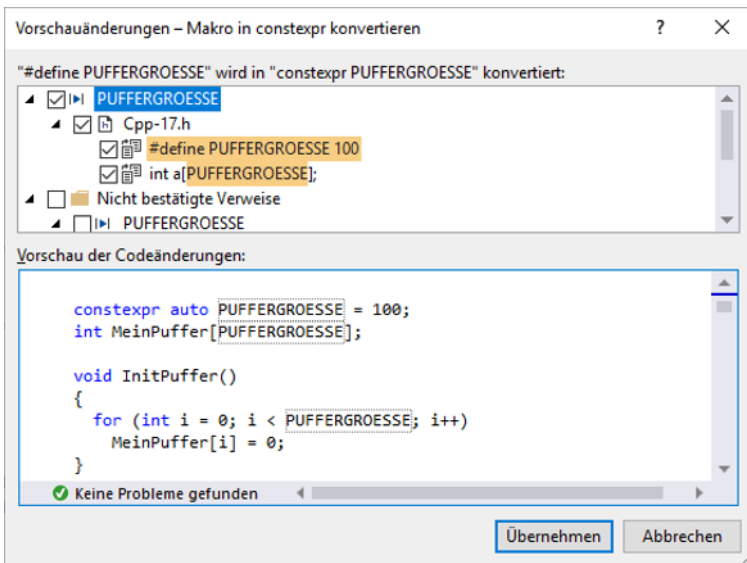
Bei einer Codeanalyse mit den C++ Core Guidelines (siehe Abschnitt 2.13) wird bei einer Konstanten empfohlen, diese mit *constexpr* zu kennzeichnen:

```
const int y = 1; // warning C26814: Die const-Variable "y" kann zur
                  // Kompilierzeit berechnet werden. Erwägen Sie die
                  // Verwendung von constexpr (con.5).
```

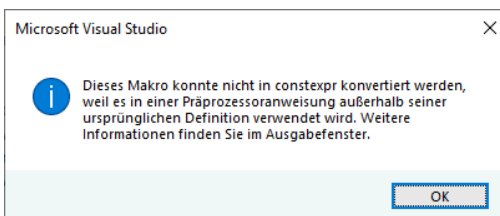
Makros, die nicht für eine bedingte Kompilation eingesetzt werden, können durch *constexpr*-Konstanten ersetzt werden. Intellisense bietet das nach einem Klick auf die Makrodefinition mit einem Klick auf das Schraubenzieher-Symbol an:



Damit können fehleranfällige Präprozessor-Makros im alten C-Stil einfach in moderne *constexpr*-Ausdrücke konvertiert werden, bei denen der Compiler die Konstante auf Typsicherheit überprüft. Wählt man diese Option aus, werden die Änderungen zunächst in einer Vorschau angezeigt und dann nach dem Anklicken des Übernehmen-Buttons durchgeführt:



Wenn ein Makro allerdings für eine bedingte Kompilation verwendet wird, verweigert Intellisense diese Änderung.





### 2.7.3 *constexpr* Funktionen

Auch Funktionen können mit *constexpr* definiert werden. Dann muss ihr Rückgabewert vom Compiler berechnet werden können. Das heißt, dass dem Compiler alle Werte bekannt sein müssen, die zum Funktionswert beitragen. In C++11 (Visual C++2015) besteht außerdem die Einschränkung, dass der Anweisungsteil nur aus einer einzigen *return*-Anweisung bestehen darf.

Beispiel: In Visual C++ 2015 wird die Definition

```
constexpr int Fakultae(int n)
{
    return n <= 1 ? 1 : (n * Fakultae(n - 1));
}
```

mit einer einzigen *return*-Anweisung vom Compiler akzeptiert. Der Funktionswert in

```
auto f4 = Fakultae(4); // Wird schon bei der Kompilation
                        berechnet
```

wird dann schon während der Kompilation berechnet und ist ebenfalls eine Compilezeit-Konstante:

```
constexpr auto f4c = Fakultae(4);
```

Die Einschränkungen für *constexpr* Funktionen wurden in C++14 und C++17 stark gelockert (ab C++20 entfallen weitere) und sind im Wesentlichen:

1. Die Funktion darf nicht virtuell sein (entfällt ab C++20).
2. Der Rückgabotyp, die Parameter und die lokalen Variablen müssen einen sogenannten literalen Datentyp haben. Damit sind im Wesentlichen vordefinierte Datentypen oder Klassen mit einem *constexpr* Konstruktor gemeint, von denen der Compiler Objekte anlegen kann. Eine Klasse, die wie *std::string* keinen *constexpr*-Konstruktor hat, kann kein Rückgabotyp einer *constexpr*-Funktion sein.
3. Die Funktion darf keinen *try*-Block enthalten (entfällt ab C++20).
4. Die Funktion darf keine *static* oder thread storage Variablen oder *goto* oder *asm* Anweisungen enthalten.

Bei einer Codeanalyse mit den C++ Core Guidelines (siehe Abschnitt 2.13) wird bei geeigneten Funktionen empfohlen, diese mit *constexpr* zu kennzeichnen:

```
int plus1(int i) // warning C26497: Die Funktion "plus1" kann als
{               // "constexpr" markiert werden (f.4).
    return i + 1;
}
```

Eine *constexpr*-Funktion ist automatisch eine *inline*-Funktion (siehe Abschnitt 7.1). Das bedeutet, dass sie in einer Header-Datei definiert werden kann.

Beispiel: Diese Variante der Funktion Fakultät wird in Visual C++ 2017 (aber nicht in Visual Studio 2015) akzeptiert:

```
constexpr int Fakultät(int n)
{
    if (n <= 1)
        return 1;
    else
        return n * Fakultät(n - 1);
}
```

Mit den reduzierten Einschränkungen von Visual Studio 2017 sind auch relativ komplexe *constexpr* Funktionen möglich:

```
constexpr int Fibonacci(int n)
{
    int F0{ 0 };
    int F1{ 1 };
    int F{};

    if (n <= 1) {
        return n;
    }
    else {
        for (int i = 2; i <= n; ++i)
        {
            F = F0 + F1;
            F0 = F1;
            F1 = F;
        }
        return F;
    }
}
```

Ruft man eine *constexpr*-Funktion mit einem Argument auf, das dem Compiler bekannt ist, berechnet er den Funktionswert bereits bei der Kompilation. Das kann zu einer Reduzierung der Laufzeit führen. Außerdem wird der Funktionswert von Intellisense angezeigt, ohne dass das Programm kompiliert werden muss.

Beispiel: Wenn eine *constexpr* Funktion ein Array zurückgibt, wird das gesamte Array bei der Kompilation berechnet:

```
const int NN = 10; // größere Werten können den Editor
                   blockieren

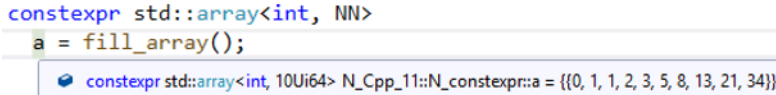
constexpr std::array<int, NN> fill_array()
{
    std::array<int, NN> v{ 0 };
    for (int i = 0; i < NN; ++i) {
        v[i] = Fibonacci(i);
    }
}
```

```

    }
    return v;
}

```

Intellisense zeigt alle Werte des Arrays im Editor an:



```

constexpr std::array<int, NN>
a = fill_array();
constexpr std::array<int, 10Ui64> N_Cpp_11::N_constexpr::a = {{0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34}}

```

Eine *constexpr*-Funktion kann auch mit einem Argument aufgerufen werden, das keine Compilezeit-Konstante ist. Dann wird die Funktion zur Laufzeit aufgerufen, und der Funktionswert ist dann auch keine Compilezeit-Konstante.

```

int m = 6;
int f6 = Fakultae(m);
constexpr int f6c = Fakultae(m); // Fehler: Argument muss constexpr
                                   sein

```

*constexpr*-Funktionen sind eine einfachere und bessere Alternative zu Funktionen, die in C++03 mit parametrisierten Makros oder mit rekursiven Funktions-Templates (siehe Abschnitt 14.1.7) formuliert wurden:

```

constexpr double Bogenmass(double Grad)
{
    return 3.14159*Grad / 180;
}

```

Mit *constexpr* können nicht nur gewöhnliche Funktionen, sondern auch Konstruktoren (siehe Abschnitt 8.1.5) definiert werden. Damit können dann Objekte eines Klassentyps definiert werden, die Compilezeit-Konstanten sind.

Beispiel: Die Klasse *array* (siehe Abschnitt 4.2.2) hat einen *constexpr*-Konstruktor. Deswegen kann ein *array*-Objekt mit *constexpr* definiert werden:

```
constexpr std::array<int, 100> a = { 1,2 };
```

Da die Klasse *string* (siehe Kapitel 3) keinen *constexpr*-Konstruktor hat, können keine Strings mit *constexpr* definiert werden:

```
constexpr std::string s=""; // Fehler
```

## 2.7.4 *static\_assert* und Unittests zur Compilezeit

Mit

```
static_assert(constant-expression, string-literal);
```

können die Werte von Compilezeit-Konstanten während der Kompilation geprüft werden. Dabei muss der konstante Ausdruck in den Typ *bool* konvertiert werden können. Falls er *true* ist, hat die *static\_assert*-Deklaration keinerlei Auswirkungen. Ist er dagegen *false*, erzeugt der Compiler eine Fehlermeldung mit der als String-Literal angegebenen Meldung.

Eine *static\_assert*-Deklaration kann global, in einem Namensbereich, in einem Block und in einer Klasse angegeben werden und damit insbesondere auch in einem Funktions- und Klassen-Template (siehe Abschnitt 14.2). Sie unterscheidet sich von einem

```
void assert(int expression );
```

aus *<assert.h>* dadurch, dass *assert* zur Laufzeit aufgerufen wird. Falls das Argument den Wert 0 hat, wird eine Fehlermeldung ausgegeben und das Programm abgebrochen. Ein *static\_assert* mit dem Argument 0 führt dagegen schon bei der Kompilation zu einer Fehlermeldung. Wenn eine *assert*-Anweisung nicht ausgeführt wird, wird der Fehler, den sie prüfen soll, nicht entdeckt.

Beispiel: Ein *static\_assert* kann alternativ zu einer *#error*-Präprozessor-Direktive verwendet werden. Mit

```
static_assert(sizeof(void *) == 4, "only 32-bit code  
generation supported.");
```

wird das Programm bei einem 64-bit Compiler nicht kompiliert, und man erhält die Compiler-Fehlermeldung

```
"only 32-bit code generation supported."
```

*static\_assert* kann auch in einer Klasse angegeben werden:

```
class C {  
    static_assert(sizeof(void *) == 4, "only 32-bit code  
generation supported.");  
};
```

Damit kann man Fehlermeldungen durch den Compiler erzeugen, wenn eine Funktion nicht den erwarteten Wert hat:

```
constexpr std::array<int, NN> a = fill_array();  
  
// Unittests bei der Kompilation:  
static_assert(a[1] == 1, "Test failed! Fibonnaci(1) != 1!\n");  
static_assert(a[10] == 55, "Test failed! Fibonnaci(10) != 55!\n");
```

## 2.8 Kommentare

Vor allem bei größeren oder komplexeren Programmen besteht gelegentlich das Bedürfnis, Anweisungen oder Deklarationen durch umgangssprachliche Bemerkungen zu erläutern.

Deshalb bieten praktisch alle Programmiersprachen die Möglichkeit, Kommentare in ein Programm zu schreiben. Ein **Kommentar** ist ein Text, der vom Compiler ignoriert wird und keine Auswirkungen auf das ausführbare Programm hat.

In C++ wird ein Kommentar entweder durch `/*` und `*/` oder durch `//` und das nächste Zeilenende begrenzt:

```
/* das ist ein Kommentar */
// das ist ein Zeilenendkommentar
```

Ausnahmen: Wenn diese Zeichen in einem String oder Kommentar enthalten sind:

```
string s = "/* kein Kommentar */";
// die /* ganze Zeile */ ist ein Kommentar
/* auch diese Zeile // ist ein Kommentar */
```

Ein mit `/*` begonnener Kommentar wird durch das nächste Auftreten von `*/` beendet. Deshalb können solche **Kommentare nicht verschachtelt** werden:

```
/* /* dieser Kommentar endet hier */ und vor dem letzten "und" meckert
   der Compiler. * /
```

Insbesondere können mit den Kommentarbegrenzern `/*` und `*/` keine Programmteile auskommentiert werden, die selbst solche Kommentare enthalten. Da man aber oft ganze Programmteile auskommentieren will, ohne die Kommentare zu entfernen, verwendet man für Programmerläuterungen meist Zeilenendkommentare:

```
/*
p = 2;    // kleinste Primzahl
...
p = p<<1; // *2, aber schneller
*/
```

Programmteile mit `/*...*/`-Kommentaren können auch mit Präprozessoranweisungen zur bedingten Kompilation (siehe Abschnitt 2.11.3) auskommentiert werden (verschachtelte Kommentare).

Visual Studio bietet ein paar kleine Hilfen für Kommentare an:

- Mit *Bearbeiten|Erweitert|Auswahl kommentieren* wird jede Zeile eines markierten Blocks mit Zeilenendkommentaren auskommentiert.
- Mit *Bearbeiten|Erweitert|Auskommentieren aufheben* wird die Auskommentierung eines markierten Blocks aufgehoben. Das funktioniert auch mit `/*`-Kommentaren.
- Mit *Strg +* springt der Cursor vom Beginn eines `/*`-Kommentars zu seinem Ende und umgekehrt.

### 2.8.1 Kommentare zur internen Dokumentation

Kommentare sind eine Möglichkeit zur **internen Dokumentation** eines Programms. Dabei wird der Quelltext im Quelltext selbst beschrieben und erläutert – im Unterschied zur

externen Dokumentation, die ein Programm für den Anwender beschreibt. Dabei werden vor allem

– Anweisungen erläutert:

```
(1) i++;    // erhöhe i
(2) i--;    // erhöhe i
(3) int j;  // Initialisierung mit 0 nicht vergessen
(4) i = 1;  // 0 anstelle von 1 erhöht den Zähler
           // einmal zu oft !! geändert 31.9.2017
(5) i = 0;  // nach 3.1.1.17, Pflichtenheft
           // Version 4.00.950 vom 24.3.2017
```

– Definitionen von Variablen beschrieben:

```
(6) double l, b;    // Länge und Breite in Metern
(7) double z;       // Zinssatz in Prozent
(8) int Operation;  // 0: Datei löschen,
                   // 1: kopieren, 2: verschieben
```

– Funktionen beschrieben:

```
(9) void f()
    /* Löscht alle Dateien auf der Festplatte. Den
     * Anwender besser vorher nochmals fragen, ob er
     * das wirklich will.
     */
    {
        ...
    }

(10) double Zinsen(double Kapital, double Zinssatz_in_Prozent)
    /*
     Name: Zinsen
     Algorithmus: Zinsformel, siehe Mathematik für Grundschulen,
                                     Klasse 3, S. 9
     Eingaben: Kapital,Zinssatz_in_Prozent (aus Eingabemaske Nr. 18)
     Ausgabe: Zins

     Autor: R. Kaiser
     Datum: 32.9.1816
     Tel.: 0123/456789 – aber ich ziehe demnächst um
     E-Mail: rk@nospam.com
     Augenfarbe: blond
     Schuhgröße: Sandalen
     */
    {
        return Kapital*(1 + Zinssatz_in_Prozent);
    }
```

Viele Programme enthalten Kommentare, die

- nicht aussagekräftig und nur eine reine Wiederholung der beschriebenen Anweisung sind wie (1). Solche Kommentare sind überflüssig und belasten den Leser unnötig.
- schlicht und einfach falsch sind wie z.B. (2). Solche Fehler kommen relativ oft vor und entstehen meist dadurch, dass Quelltext geändert bzw. kopiert wird, ohne dass der Kommentar aktualisiert wird.
- besser durch eine einfache Anweisung ersetzt werden können wie z.B. (3). Hier kann man anstelle des Kommentars `j` besser gleich initialisieren.

Kommentare sollen hilfreiche Erläuterung des Programms sein und **Informationen enthalten, die sich nicht unmittelbar aus dem Programmtext ergeben**. So weist (4) darauf hin, dass der offensichtlich naheliegende Wert 0 falsch ist und der korrigiert wurde. (5) begründet, weshalb das gerade so gemacht wurde.

Obwohl die Kommentare (6), (7) und (8) Informationen enthalten, die sich nicht unmittelbar aus dem Programmtext ergeben, sind sie nur deswegen notwendig, weil die im Kommentar aufgeführten Informationen nicht aus dem Namen der Variablen hervorgehen. Diese Kommentare sind aber eventuell an der Stelle des Programms, an der die Variablen verwendet werden (z.B. eine Bildschirmseite weiter), nicht mehr unmittelbar sichtbar. **Kommentare** sollten deshalb **nur** verwendet werden, **wenn sich deren Inhalt nicht durch geeignete Sprachelemente ausdrücken lässt**. Anstelle der Kommentare sind in (6) und (7) aussagekräftige Variablennamen und in (8) ein Aufzählungstyp als Datentyp sinnvoller:

```
(6) double Laenge_in_Metern, Breite_in_Metern; // Maßeinheiten
    // angeben, falls Missverständnisse möglich sind
(7) double Zinssatz_in_Prozent; // nur "Zins" wäre zu ungenau
(8) enum {Datei_loeschen, Datei_kopieren, Datei_verschieben} Aktion;
```

Der erhöhte Schreibaufwand für aussagekräftige Variablennamen ist meist wesentlich geringer als der Aufwand durch eine Fehlersuche, weil die Bedeutung von `z` verwechselt wird: „Zinssatz“ („6“ bei 6%), „Zinssatz in %“ („0,06“ bei 6%) oder „Zins“ („6 Euro“ bei 6% für 100 Euro in einem Jahr).

Das heißt allerdings nicht, dass jeder **Variablenname** mindestens 10 Zeichen lang sein muss. Wenn keine Gefahr für Missverständnisse besteht, können Variablennamen auch nur aus einem Buchstaben bestehen. Stroustrup (1997, Abschnitt 4.9.3) empfiehlt, Namen mit einem großen Gültigkeitsbereich **lang** und beschreibend zu wählen. Ein lokaler Name in einem kleinen Block ist aber oft übersichtlicher, wenn er **kurz** ist.

Funktionsbeschreibungen wie in (10) findet man häufig. Hier stellt sich natürlich die Frage nach dem Sinn einer halbseitigen Beschreibung für einen unmissverständlichen Einzeiler. Oft reicht eine Beschreibung wie in (9) völlig aus.

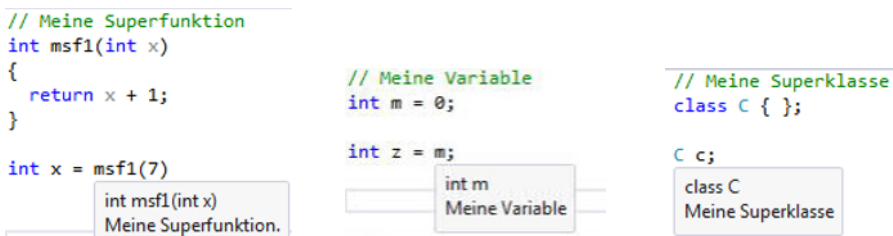
Obwohl die häufige Verwendung von Kommentaren oft fast mit **Softwarequalität** gleichgesetzt wird (es soll Firmen geben, die für jede Programmzeile einen Kommentar verlangen), wird empfohlen

- **so wenig Kommentare wie möglich** zu schreiben und anstelle von Kommentaren alle Möglichkeiten der Programmiersprache ausschöpfen, die Kommentare überflüssig machen (z.B. aussagekräftige Namen für Variablen).
- immer dann, wenn man die Notwendigkeit für einen Kommentar sieht, zuerst zu überlegen, ob man das **Programm nicht so formulieren kann, dass ein Kommentar überflüssig** wird. Mit Kommentaren kann man undurchsichtige Programmteile erläutern. Solche Programmteile sind aber oft ein Hinweis darauf, dass sie nicht richtig durchdacht sind. Undurchschaubare Programmteile verstecken oft undurchschaubare Fehler.

Eine ausführliche Diskussion zum Thema Kommentare findet man in „Code Complete“ (McConnell 2004) und in „The C++ Programming Language“ (Stroustrup 1997, Abschnitt 6.4).

## 2.8.2 Intellisense- und Doxygen Kommentare

In Visual Studio werden Kommentare an bestimmten Stellen im Quelltext von Intellisense berücksichtigt und als Tooltip und Quickinfo angezeigt. Dazu gehören Kommentare, die unmittelbar vor der Definition einer Variablen, einer Funktion oder einer Klasse angegeben werden.



Seit Visual Studio 2019.6 sind differenziertere Angaben möglich. Nach dem Eintippen von `///` vor einer Variablen, Funktion oder Klasse wird eine Textvorlage im XML- oder Doxygen-Format (Auswahl des Formats über *Extras|Optionen|Text Editor|C/C++|Codestyle*) erzeugt,

```

/// <summary>
///
/// </summary>
/// <param name="x"></param>
/// <param name="y"></param>
/// <returns></returns>
int plus1(int x, double y)
{
    return x + y;
}

```

in die man die Namen der Parameter und eine Beschreibung eintragen kann.



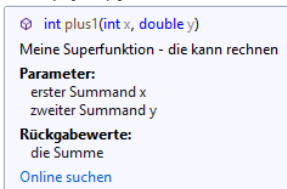
```

/// <summary>
/// Meine Superfunktion - die kann rechnen
/// </summary>
/// <param name="erster Summand x"></param>
/// <param name="zweiter Summand y"></param>
/// <returns>die Summe</returns>
int plus1(int x, double y)
{
    return x + y;
}

```

Diese Informationen werden dann als Tooltip angezeigt, wenn man die Variable, Funktion oder Klasse verwendet und mit dem Mauszeiger über den Namen fährt:

```
int x = plus1(3, 4);
```



Wählt man für diese Kommentare das Doxygen-Format, kann man die Kommentare mit dem freien doxygen, (<http://www.doxygen.org>) aus dem Programm extrahieren und daraus Dokumente in Formaten wie HTML, RTF, PDF usw. erzeugen.

```

/**
 * @brief Meine Superfunktion - die kann rechnen
 * @param x erster Summand
 * @param y zweiter Summand
 * @return die Summe
 */
int plus1(int x, double y)

```

Auch diese Kommentare werden von Intellisense angezeigt.

## 2.9 Exception-Handling Grundlagen: *try*, *catch* und *throw*

Falls eine Funktion ihre Aufgabe nicht erfüllen kann, informiert sie den Aufrufer darüber traditionellerweise (z.B. in C) durch einen speziellen Rückgabewert oder indem sie eine Statusvariable (error flag) setzt. Diese Techniken haben aber Schwächen. Die Standardbibliothek verwendet stattdessen oft Exception-Handling (Ausnahme-Behandlung). Damit diese Technik in den nächsten Kapiteln zusammen mit der Standardbibliothek verwendet werden kann, werden jetzt die elementaren Konzepte vorgestellt. Eine ausführliche Darstellung folgt dann in Kapitel 10.

Wenn bei der Ausführung von Anweisungen (das sind oft Funktionsaufrufe) eine Exception auftreten kann, nimmt man diese Anweisungen in einen Block `{ ... }` nach *try* auf.

*try-block:*  
*try compound-statement handler-seq*

Dann kann man die Exception in einem Exception-Handler der *try*-Anweisung abfangen, der zu der Exception passt. Ein Exception-Handler beginnt mit *catch* und enthält einen Block `{ ... }` mit Anweisungen.

*handler:*  
*catch ( exception-declaration ) compound-statement*

Der auf *try* folgende Block wird auch als **try-Block** bezeichnet, und der auf *catch* folgende als **catch-Block**.

In diesem einführenden Kapitel werden nur Exception-Handler der Form

```
catch (std::exception& e)
{
    // ...
}
```

verwendet. Zu dem nach

```
#include <exception>
```

verfügbaren Datentyp `std::exception` passen alle Exceptions der Standardbibliothek. Die Möglichkeit, nach einem *try*-Block mehrere Exception-Handler anzugeben, wird vorläufig nicht genutzt.

Falls bei der Ausführung der Anweisungen des *try*-Blocks **keine Exception** ausgelöst wird, ist der Programmablauf derselbe, wie wenn die Anweisungen nicht in einem *try*-Block enthalten wären. Der Exception-Handler wird ignoriert, und danach wird die auf den *catch*-Block folgende Anweisung ausgeführt.

Beispiel: Die in Abschnitt 3.4 noch genauer vorgestellte Funktion `std::stoi` gehört zur Standardbibliothek von C++. Sie konvertiert das *string*-Argument in eine Zahl, wenn es eine Zahl darstellt. Falls nicht, wird eine Exception ausgelöst.

Bei der Ausführung der Anweisungen im *try*-Block von

```
void Beispiel_1()
{
    try
    {
        cout << "1. Vor std::stoi" << endl;
        unsigned int idx = 0;
        int i = std::stoi("123", &idx);
        cout << "2. i=" << i << endl;
    }
}
```

```

    catch (std::exception& e)
    {
        cout<<"3. Exception-Handler"<<endl;
    }
    cout<<"4. nach try-catch"<<endl;
}

```

wird keine Exception ausgelöst. Deswegen erhält man die Ausgabe

1. Vor std::stoi
2. i=123
4. nach try-catch

Falls bei der Ausführung einer Anweisung *s* im *try*-Block dagegen **eine Exception** ausgelöst wird, wird nach der Exception der *catch*-Block des ersten Exception-Handlers ausgeführt, der zu der Exception passt. Die auf *s* folgenden Anweisungen im *try*-Block werden nicht ausgeführt.

Beispiel: Ersetzt man im letzten Beispiel das Argument von *std::stoi* durch „abc“, löst *std::stoi* eine Exception aus, und man erhält die Meldungen

1. Vor std::stoi
3. Exception-Handler
4. nach try-catch

In einem *try*-Block fasst man meist solche Anweisungen zusammen, die gemeinsam ein bestimmtes Ergebnis erzielen sollen. Falls dann eine dieser Anweisungen ihr Teilergebnis nicht beitragen kann, macht es meist keinen Sinn, die darauffolgenden Anweisungen auszuführen. Durch die Aufnahme dieser Anweisungen in einen *try*-Block wird die Ausführung der folgenden Anweisungen unterbunden. Im Exception-Handler kann man dann darauf hinweisen, dass etwas schief ging.

In einem Exception-Handler, der mit

```

    catch (std::exception& e)

```

beginnt, ist *e* eine Variable des Datentyps *std::exception*, die die Exception darstellt. Dieser Datentyp hat eine Elementfunktion ***what*** mit dem Rückgabetyt *char\**. *what* gibt einen nullterminierten String zurück, der die Ursache des Fehlers beschreibt, der zu der Exception geführt hat.

Beispiel: Ergänzt man den *catch*-Block im letzten Beispiel um eine Ausgabe von *what*,

```

    catch (std::exception& e)
    {
        cout<<"3. Exception-Handler"<<endl;
        cout << e.what() << endl;
    }

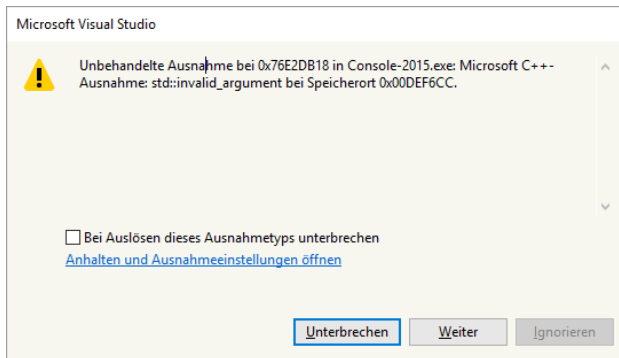
```

erhält man die Ausgabe

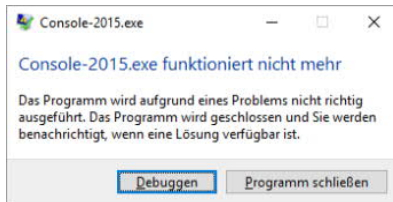
1. Vor `std::stoi`
3. Exception-Handler  
`invalid stoi argument`
4. nach `try-catch`

Falls eine Anweisung eine Exception auslöst und nicht innerhalb einer `try`-Anweisung ausgeführt wird, wird das Programm nach der Exception abgebrochen.

- Startet man das Programm im Debugger, wird ein Fenster angezeigt, in dem auf die Exception hingewiesen wird, und in dem man durch Anklicken eines Buttons mit der Aufschrift „Unterbrechen“ im Editor die Zeile anzeigen lassen kann, die die Exception ausgelöst hat:



- Bei der Ausführung des Programms ohne Debugger wird ein Fenster angezeigt, in dem auf den Programmabbruch hingewiesen wird:



Deswegen sollte man alle Anweisungen (insbesondere alle Funktionsaufrufe), die eine Exception auslösen können, in einen `try`-Block aufnehmen, und im zugehörigen Exception-Handler angemessen auf die Exception reagieren.

Um in einer eigenen Funktion eine Exception auszulösen, verwendet man eine ***throw***-Anweisung

```
throw assignment-expressionopt
```

und gibt für *expression* einen Ausdruck an. Dieser Ausdruck ist am besten eine Exception-Klasse, wie z.B. die nach

```
#include <stdexcept>
```

verfügbare Klasse *invalid\_argument*, der man einen String übergibt. Die Ausführung von **throw** bewirkt, dass das Programm im nächsten umgebenden Exception-Handler fortgesetzt wird, der zu der Exception passt. Der bei *throw* an *exception* übergebene String steht dann als Rückgabewert von *what* zur Verfügung. Dabei muss *what* über die Exception-Variable aufgerufen werden, die in den runden Klammern nach *catch* angegeben wird.

Beispiel: Falls die Anweisungen einer Funktion nur für positive Argumente ausgeführt werden können, kann man eine Exception auslösen, falls das nicht zutrifft:

```
int Quersumme(int n)
{
    if (n < 0)
        throw std::invalid_argument("Quersumme:für negatives
                                   Argument nicht definiert");
    // Berechne die Quersumme q
    return q;
}
```

Ruft man diese Funktion dann mit einem negativen Argument in einem *try*-Block auf

```
void Beispiel_2()
{
    try
    {
        int qs = Quersumme(-1);
    }
    catch (std::exception& e)
    {
        cout << e.what() << endl;
    }
}
```

wird die Meldung

Quersumme:für negatives Argument nicht definiert

ausgegeben.

Durch die Angabe **noexcept** nach der Parameterliste einer Funktion wird zum Ausdruck gebracht, dass die Funktion keine Exception auslöst. Ohne eine solche Angabe bedeutet das, dass die Funktion eine Exception auslösen kann. Eine solche Funktion sollte man dann in einem *try*-Block aufrufen. Im C++-Standard sind alle Funktionen, die keine Exception auslösen können, mit *noexcept* gekennzeichnet.

Beispiel: Da im C++-Standard nach der Funktion

```
int stoi(const string& str, size_t* idx = 0, int base = 10);
```

kein *noexcept* steht, ist das ein Hinweis darauf, dass diese Funktion eine Exception auslösen kann. Diese Funktion sollte man deshalb in einem *try*-Block aufrufen.

Eine Funktion mit einer solchen Angabe wie z.B. die *string*-Funktion

```
void clear() noexcept;
```

kann man dagegen auch aufrufen, ohne dass der Aufruf in einem *try*-Block enthalten ist.

## Aufgaben 2.9

Schreiben Sie die Lösungsfunktionen in eine wie in Abschnitt 1.2.5 beschriebene Header-Datei (z.B. in die schon in Aufgabe 2.4.4 angelegte Header-Datei) und rufen Sie diese auf.

- Schreiben Sie eine Funktion *throwException* mit einem *int*-Parameter, die für ein Argument  $< 0$  eine Exception mit der Message „Argument  $< 0$ “ auslöst. Rufen Sie *throwException* dann mit einem negativen Argument
  - in einer *try*-Anweisung auf. Geben die die Meldung aus.
  - außerhalb von einer *try*-Anweisung auf. Starten Sie das Programm einmal im Debugger und einmal ohne Debugger (*Debuggen*|*Starten ohne Debugger*).
  - Exceptions werden auch über verschachtelte Funktionsaufrufe hinweg weitergegeben, wenn die Exception nicht abgefangen wird. Rufen Sie *throwException* mit einem negativen Argument ohne *try* in einer weiteren Funktion *fl* auf, und diese dann in einem *try*-Block.

## 2.10 Namensbereiche – Grundlagen

Mit einem **Namensbereich** kann man globale Variablen, Funktionen usw. mit demselben Namen definieren. Damit wir diese Möglichkeit bei einigen der folgenden Aufgaben und Beispiele nutzen können, soll jetzt kurz gezeigt werden, wie man Namensbereiche definieren und verwenden kann. Eine ausführliche Darstellung folgt in Abschnitt 9.

Ein Namensbereich wird im einfachsten Fall wie in

```
namespace Bezeichner
{
    int n = 17;
    void f()
    {
        // ...
    }
}
```

```

void test()
{
    f(); // Im Namensbereich kann f mit dem Namen f angesprochen
        // werden
}

```

definiert. Hier ist ein Bezeichner der Name des Namensbereichs. Zwischen den geschweiften Klammern kann man dann Variable, Funktionen usw. definieren. **Innerhalb** des Namensbereichs kann eine Variable, Funktion usw. allein unter ihrem Namen angesprochen werden. **Außerhalb** des Namensbereichs kann man sie mit dem Namen des Namensbereichs, einem `::` und dem Namen des Elements ansprechen.

Beispiel: Wenn man einen Namen für eine globale Variable oder Funktion zweimal vergeben will, wird das vom Compiler als Namenskonflikt bemängelt. Nimmt man diese Definitionen in verschiedene Namensbereiche auf,

```

namespace N_1
{
    void f() { }
}

namespace N_2
{
    void f() { }
}

```

kann man diese Funktionen folgendermaßen ansprechen:

```

N_1::f();
N_2::f();

```

Die Elemente der C++-Standardbibliothek sind im Namensbereich *std* enthalten (siehe auch Abschnitt 2.4.6).

## Aufgaben 2.10

Bisher wurden bei den Lösungen der Aufgaben alle Funktionen, Variablen usw. ohne weitere Gliederung in eine einzige Header-Datei geschrieben. Das kann etwas unübersichtlich werden. Nehmen Sie die Lösungen der Aufgaben dieses Kapitels in einen Namensbereich (z.B. mit dem Namen *N\_Aufgaben\_Elementare\_Datentypen*) auf und geben Sie diesen Namen beim Aufruf der Funktionen an.

Nehmen Sie auch bei den zukünftigen Aufgaben alle Lösungen in einen Namensbereich auf.

## 2.11 Präprozessoranweisungen

Der Präprozessor war bei älteren C-Compilern ein eigenständiges Programm, das vor dem eigentlichen C-Compiler aufgerufen werden musste. Er hat aus dem Quelltext eine Datei erzeugt, die dann vom C-Compiler bearbeitet wurde. In C++ muss der Präprozessor aber nicht mehr extra aufgerufen werden. Seine Aufgabe wird vom Compiler übernommen.

Alle Zeilen in einem C/C++-Programm, die mit dem Zeichen `"#"` (eventuell nach White-space-Zeichen) beginnen, sind Präprozessoranweisungen. Mit ihnen kann man z.B. steuern, dass Worte (Makros) im Quelltext durch andere ersetzt werden.

Der Präprozessor ist ein einfaches Textbearbeitungsprogramm, das weitgehend unabhängig von C++ ist:

- Er behandelt den Quelltext lediglich als Folge von Worten, ohne ihre Bedeutung in C++ zu berücksichtigen (z.B. ob ein Name nur lokal ist, oder ob er einen Datentyp, eine Variable oder ein Schlüsselwort darstellt).
- Die wenigen C++-Sprachregeln, die er beachtet sind z.B. Kommentare am Ende von Präprozessoranweisungen und ganzzahlige Ausdrücke nach `#if`.
- Die Syntax der Präprozessoranweisungen ist völlig unabhängig von der C++-Syntax.

Der vom Präprozessor erzeugte Text muss ein korrektes C++-Programm sein, damit es vom Compiler übersetzt werden kann.

Diesen Text (Dateien mit der Endung „.i“) kann man nach der Einstellung *Projekt|-Eigenschaften|Konfigurationseigenschaften|C/C++|Präprozessor|Präprozessorlauf* auch anschauen. Den Präprozessor von Visual C++ kann man auch mit `cl /P` aufrufen (z.B. von einer Kommandozeile aus, siehe Abschnitt 1.2.6).

Beispiel: Falls „test.h“ nur die Zeile `„#include <fstream>“` enthält, erzeugt

```
cl /P test.h
```

eine ca. 1 MB große Datei „test.i“.

### 2.11.1 Die *#include*-Anweisung

Mit einer *#include*-Anweisung kann eine Datei eingebunden werden. Das hat denselben Effekt, wie wenn die *#include*-Anweisung durch den Inhalt der angegebenen Datei ersetzt würde. Die eingebundene Datei kann weitere *#include*-Anweisungen enthalten, die dann ebenfalls eingefügt werden.

Grundsätzlich sollten alle *#include*-Anweisungen vor allen anderen Anweisungen stehen. Eine Missachtung dieser Empfehlung kann in Verbindung mit namespaces überraschende Auswirkungen haben (siehe Abschnitt 9.3).

Der Dateiname wird meist in einer dieser beiden Formen angegeben:

1. **in spitzen Klammern** wie in



```
#include <header_name>
```

Falls *header\_name* eine vollständige Pfadangabe ist, sucht der Präprozessor nur nach dieser Datei. Bei einem unvollständigen Pfad sucht er die Datei in all den Verzeichnissen, die unter *Projekt|Eigenschaften|Konfigurationseigenschaften|C/C++|Allgemein|Zusätzliche Includeverzeichnisse* eingetragen sind.

```
Beispiele: #include <c:\CppUtils\Utils.h> // vollständiger Pfad
           #include <CppUtils\Utils.h>   // unvollständiger Pfad
           #include <vector>
```

## 2. in Anführungszeichen wie in

```
#include "file_name"
```

```
Beispiel: #include "Utils.h" // zuerst im Projektverz.
           #include "c:\CppUtils\Utils.h" // nur diese
```

Falls *file\_name* eine vollständige Pfadangabe ist, wird nur nach dieser Datei gesucht. Andernfalls wird die Datei in dieser Reihenfolge in den folgenden Verzeichnissen gesucht:

- im Verzeichnis, das die Datei mit der *#include*-Anweisung enthält
- im Fall von verschachtelten *#includes* in den Verzeichnissen, die die Datei einbinden
- im aktuellen Verzeichnis
- in den unter 1. beschriebenen Verzeichnissen

Im Unterschied zu einem Stringliteral wird das Zeichen „\“ in einer *include*-Anweisung nicht als Beginn einer Escape-Sequenz interpretiert. Deshalb muss man ein „\“ Zeichen in einer Pfadangabe nur einmal angeben.

Da eine *#include*-Anweisung denselben Effekt hat wie wenn die eingebundene Datei im Quelltext steht, kann eine solche Datei beliebige C++-Anweisungen enthalten, die an der eingebundenen Stelle zulässig sind. Falls eine solche Datei aber auch in mehrere Übersetzungseinheiten eines Projekts eingebunden werden soll, darf sie nur Deklarationen enthalten, die keine Definitionen sind. Dann werden die Definitionen und die Deklarationen auf zwei verschiedene Dateien verteilt, die meist die Endung „.h“ und „.cpp“ haben.

Visual Studio an bietet ein paar kleine Hilfen für *#include*-Anweisungen an:

- Nach dem Eintippen von *#include* " bzw. von *#include* < werden die \*.h-Dateien aus den entsprechenden Verzeichnissen angeboten.
- Im Kontextmenü zu einer *#include*-Anweisung wird angeboten, die Datei zu öffnen.

### 2.11.2 Makros Ø

Ein **Makro ohne Parameter** wird nach diesem Schema definiert:

```
# define identifier replacement-list new-line
```

Der *identifier* ist dann ein Makro, das vom Präprozessor bei jedem Auftreten (außer in einem Stringliteral oder in einem Kommentar) ab seiner Definition durch die *replacement-list* ersetzt wird.

Projektweite Makros können unter *Projekt|Eigenschaften|Konfigurationseigenschaften|C/C++|Präprozessor|Präprozessordefinitionen* eingetragen werden.

Beispiel: Im C++-Standard sind keine Definitionen für mathematische Konstanten wie  $\pi$ ,  $1/\pi$ ,  $e$  usw. enthalten. Bei Visual C++ enthält „math.h“ die folgenden Makros, wenn zuvor (z.B. vor dem ersten `#include <cmath>` oder projektweit) das Makro `_USE_MATH_DEFINES` definiert wurde:

```
#define M_E          2.71828182845904523536
#define M_PI         3.14159265358979323846
#define M_1_PI        0.318309886183790671538
```

Der Präprozessor ersetzt dann die Textzeile

```
double U = 2 * M_PI*r;
```

durch

```
double U = 2 * 3.14159265358979323846*r;
```

Mit

```
# undef identifier new-line
```

kann ein Makro wieder außer Kraft gesetzt werden. Falls der dabei angegebene Name nicht der eines zuvor definierten Makros ist, wird *undef* ignoriert: Bei einem Schreibfehler erfolgt keine Fehlermeldung oder Warnung.

Da ein Makro zu Textersetzungen führt, die unabhängig von der C++-Syntax sind, können Makros zu undurchsichtigen Fehlermeldungen führen.

Bei der Definition eines Makros sind keine speziellen Zeichen wie `=` oder ein abschließendes Semikolon notwendig. Sind sie jedoch vorhanden, werden sie ebenfalls eingesetzt.

Beispiel: Nach der Definition

```
#define N = -1 // Das Zeichen "=" ist falsch!
```

wird die Zeile

```
i = N;
```

durch

```
i = = -1;
```

ersetzt und vom Compiler mit einer Fehlermeldung bemängelt. Dieser Fehlermeldung sieht man ihre Ursache nicht unbedingt sofort an, da die Zeile „`i = N;`“ korrekt aussieht. Wenn sich die Definition des Makros auf einer anderen Bildschirmseite als die Fehlermeldung befindet, kann die Fehlersuche auch etwas länger dauern.

Makros werden im gesamten Quelltext ersetzt, unabhängig von allen Sichtbarkeitsregeln von C++.

Beispiel: Das global definierte `m` wird auch in der Funktion `f` ersetzt und das lokal definierte Makro `n` auch in der Funktion `test`:

```
#define m 10
int n = 100;

void f()
{
    int m; // wird durch "int 10;" ersetzt
    #define n 10
}

void test()
{
    int i;
    if (i<n) ... // wird durch "if (i<10);" ersetzt.
}
```

Bei den meisten C-Compilern sind im Unterschied zu C++ keine symbolischen Konstanten als Arraygrenzen zulässig. Für solche Compiler wird ein Name für die Anzahl der Elemente eines Arrays (siehe Abschnitt 4.2.1) oft als Makro definiert:

```
#define MAX 100
int a[MAX]; // wird durch a[100] ersetzt
```

Angesichts der Fehlermöglichkeiten bei Makros sollte man in C++ symbolische Konstanten mit `const` verwenden.

Damit man Makros leicht als solche erkennen und ihre Besonderheiten beachten kann, werden sie oft in Großbuchstaben geschrieben. Allerdings wird diese Regel weder vom Compiler erzwungen noch in den Standardbibliotheken konsequent eingehalten.

Nach dem C++-Standard sind unter anderem diese Makros definiert:

|                       |                                                       |
|-----------------------|-------------------------------------------------------|
| <code>__LINE__</code> | Nummer der aktuellen Zeile der Quelltextdatei         |
| <code>__FILE__</code> | Name der aktuellen Quelltextdatei                     |
| <code>__DATE__</code> | Datum der Übersetzung der aktuellen Quelltextdatei    |
| <code>__TIME__</code> | Uhrzeit der Übersetzung der aktuellen Quelltextdatei. |

In Visual C++ stellen die vordefinierten Makros

```
__FUNCTION__ // nur Name der Funktion
```

```

__FUNCSIG__ // die Signatur der Funktion
__FUNCDNAME__ // die „dekorierte“ Signatur der Funktion

```

in einer Funktion immer den Namen der aktuellen Funktion dar.

Beispiel: Mit einem Makro wie

```

#define TRACE std::cout<<__FILE__<< ", line: " <<\
__LINE__ << ", function: "<< __FUNCTION__<<endl;

```

kann man den Namen der aktuellen Quelltextdatei, die Zeilennummer und den Namen der aktuellen Funktion protokollieren. Nimmt man dieses Makro in eine Funktion „void f()“ auf, erhält man eine Zeile wie:

```
test.cpp, line: 56, function: void f()
```

In *TRACE* sieht man auch, wie man mit einem „\“ am Ende einer Zeile **mehrzeilige Makros** definieren kann.

### 2.11.3 Bedingte Kompilation

Mit den Präprozessoranweisungen für die bedingte Kompilation

```

# if constant-expression new-line group opt
# elif constant-expression new-line group opt
# else new-line group opt
# endif new-line

```

kann **in Abhängigkeit** vom Wert eines **konstanten Ganzzahlausdrucks** gesteuert werden, ob eine Gruppe von Zeilen in die vom Präprozessor erzeugte Ausgabedatei übernommen und anschließend vom Compiler übersetzt wird oder nicht. Da der Präprozessor vor dem Compiler ausgeführt wird, können die Ganzzahlausdrücke keine Symbole sein, die nur der Compiler kennt (z.B. const int x=17).

Die Logik für die Übernahme von Textzeilen in die Ausgabedatei des Präprozessors folgt dabei der Logik für die Ausführung der Zweige bei einer *if*-Anweisung. Die Bedingungen werden der Reihe nach geprüft, und die erste Gruppe, die auf einen von Null verschiedenen Wert folgt, wird übernommen.

Beispiel: Die Anweisungen in der linken und rechten Spalte sind gleichwertig. Dabei stehen k1, k2 usw. für ganzzahlige konstante Ausdrücke.

|                |                |
|----------------|----------------|
| #if k1         | #if k1         |
| Zeilengruppe 1 | Zeilengruppe 1 |
| #elif k2       | #else          |
| Zeilengruppe 2 | #if k2         |
| #elif k3       | Zeilengruppe 2 |
| Zeilengruppe 3 | #else          |
| #else          | #if k3         |
| Zeilengruppe 4 | Zeilengruppe 3 |

```

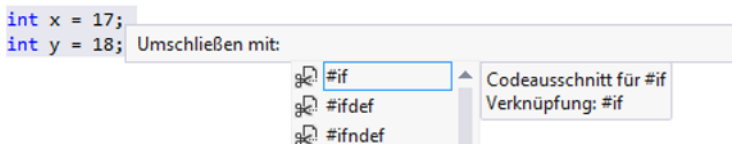
        #endif
        #else
        Zeilengruppe 4
        #endif
    #endif
#endif

```

Der konstante Ganzzahlausdruck nach `#if` oder `#elif` kann auch ein Makro für ganzzahlige Werte sein, sowie ein Ausdruck, der solche Makros mit Ganzzahl-Literalen vergleicht (mit einem der Operatoren `=`, `!=`, `<`, `<=`, `>` oder `>=`).

Visual Studio bietet ein paar kleine Hilfen für die bedingte Kompilation an:

- Mit *Bearbeiten*|*Intellisense*|*Umschließen mit* bzw. im Kontextmenü mit *Ausschnitt* kann ein markierter Block mit `#if`, `#ifdef` oder `#ifndef` umgeben werden:



- Mit *Strg* + *'* springt der Cursor vom Beginn eines `#if`, `#ifdef` oder `#ifndef`-Blocks zu seinem Ende und umgekehrt.

Beispiele:

1. Nicht ganzzahlige Ausdrücke nach `#if` sind nicht zulässig:

```

#if 1.2    // error: Ungültiger Ausdruck für
#if "123"  //                      Ganzzahlkonstante

```

2. Mit diesen Präprozessoranweisungen kann man über den Wert eines Makros räumlich getrennte Programmteile aktivieren bzw. deaktivieren. So kann man z.B. mit bedingten Anweisungen wie

```

#if DEBUG
TRACE
#endif

```

durch die Deaktivierung des Makros `DEBUG` erreichen, dass für die `TRACE` Anweisung kein Code erzeugt wird, der die Größe und die Laufzeit des Programms beeinflusst.

3. Verwendet man nach `#if` einen Namen, der nicht als Makro definiert wurde, wird der Wert des Ausdrucks als 0 (Null) ausgewertet:

```

#if nicht_definiertes_Makro
// wird nicht verarbeitet
#endif

```

Mit einem nicht definierten Makro kann man Programmteile ausblenden, die mehrzeilige Kommentare enthalten. Dazu verwendet man einfach nur ein Präprozessor-Symbol, das zuvor nicht definiert wurde:

```

#if AUSKOMMENTIERT // ein nicht definiertes Makro
void f() { }
/* ein mehrzeiliger
 * Kommentar
 */
#endif

```

Sie sind deshalb eine Alternative zu verschachtelten Kommentaren.

4. Die meisten Compiler definieren zu ihrer Identifikation Makros mit Ganzzahlkonstanten. In Visual C++ sind die folgenden Makros mit der Versionsnummer des Compilers vordefiniert (Stand Februar 2020):

| <i><b>_MSC_VER</b></i>                         | <i><b>Visual C++ Version</b></i>                                   | <i><b>Visual Studio Version</b></i>                                   |
|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 1920, 1921, 1922,<br>1923, 1924, 1925,         | Visual C++<br>14.2, 14.21, 14.22,<br>14.23, 14.24, 14.25           | Visual Studio 2019<br>16.0, 16.1, 16.2<br>16.3, 16.4, 16.5            |
| 1910, 1911, 1912,<br>1913, 1914, 1915,<br>1916 | Visual C++<br>14.1, 14.11, 14.12,<br>14.13, 14.14, 14.15,<br>14.16 | Visual Studio 2017<br>15.0, 15.3, 15.5,<br>15.6., 15.7, 15.8,<br>15.9 |
| 1900                                           | Visual C++ 14.0                                                    | Visual Studio 2015                                                    |
| 1800                                           | Visual C++ 12.0                                                    | Visual Studio 2013                                                    |
| 1700                                           | Visual C++ 11.0                                                    | Visual Studio 2012                                                    |
| 1600                                           | Visual C++ 10.0                                                    | Visual Studio 2010                                                    |
| 1500                                           | Visual C++ 9.0                                                     | Visual Studio 2008                                                    |
| 1400                                           | Visual C++ 8.0                                                     | Visual Studio 2005                                                    |
| 1310                                           | Visual C++ 7.1                                                     | Visual Studio 2003                                                    |
| 1300                                           | VC++ 7.0                                                           | Visual Studio 2002                                                    |
| 1200                                           | VC++ 6.0                                                           | Visual Studio 6                                                       |

Hier stehen die ersten beiden Ziffern für die Hauptversion und die letzten beiden für eine Unterversion. Damit kann man Programme schreiben, die mit verschiedenen Compiler-Versionen übersetzt werden können und die ihre Besonderheiten berücksichtigen.

```

#if _MSC_VER >= 1920 // Visual Studio 2019
// Anweisungen für Visual C++ 2019 und neuere Versionen
#elif _MSC_VER >= 1910 // Visual Studio 2017
// Anweisungen für Visual C++ 2017
#elif _MSC_VER >= 1900 // Visual Studio 2015
// Anweisungen für Visual C++ 2015
// usw.
...
#endif

```

Die Unterversion von Visual Studio erhält man mit dem Makro **\_MSC\_FULL\_VER**. Es für jedes Upgrade von Visual Studio verschieden. Die Version der Standardbibliothek erhält man mit **\_CPPLIB\_VER**.

5. In Visual Studio kann man unter *Projekt|Eigenschaften|Konfigurationseigenschaften|C/C++|Präprozessor* unter *Präprozessordefinitionen* Makros definieren, die dann im ganzen Projekt gelten. Hier trägt Visual Studio z.B. das Makro `_DEBUG` ein, wenn die Build-Konfiguration „Debug“ aktiviert ist, und `NDEBUG` bei einer „Release“-Konfiguration.
6. Mit weiteren vordefinierten Makros erhält man Informationen über die Projekttypen.

Der ganzzahlige konstante Ausdruck in `#if` und `#elif` kann den Operator *defined* in einer der beiden Formen enthalten:

```
defined identifizier
defined ( identifizier )
```

Dieser Ausdruck hat den Wert 1, falls der Bezeichner zuvor Makro definiert wurde (mit `#define` oder als vordefiniertes Makro), und andernfalls den Wert 0. Mit dem Operator `!` vor *defined* kann man die Bedingung negieren:

```
#if defined Makroname
#if !defined Makroname // if not defined Makroname
```

Diese beiden Präprozessoranweisungen sind gleichwertig mit

```
# ifdef identifizier new-line group opt
# ifndef identifizier new-line group opt
```

Beispiele:

1. Ein mit dem Wert 0 (Null) definiertes Makro gilt als definiert. Deshalb ist die Bedingung erfüllt, wenn man es nach `#ifdef` verwendet, während sie nach `#if` nicht erfüllt ist. Bei Makros mit dem Wert 0 muss man deshalb darauf achten, dass man `#if` und `#ifdef` nicht verwechselt:

```
#define Makro 0          #define Makro 0
#ifdef Makro             #if Makro
// wird übersetzt       // wird nicht übersetzt
#endif                  #endif
```

2. Der C++-Standard schreibt vor, dass jeder C++-Compiler das Makro `__cplusplus` definiert, während der C-Standard vorschreibt, dass dieses Makro von keinem C-Compiler definiert werden darf. Damit lassen sich Programme schreiben, die sowohl ein C- als auch ein C++-Compiler übersetzen kann:

```
#ifdef __cplusplus // aus vcruntime.h
#define NULL 0
#else
#define NULL ((void *)0)
#endif
```

3. Mehrfachdefinitionen von Variablen, Datentypen, Makros usw. kann man wie mit

```
#ifndef TRUE
# define TRUE 1
#endif
```

vermeiden. Falls mehrere Dateien die Datei mit diesen Anweisungen einbinden, wird das Makro nur definiert, falls es nicht schon zuvor definiert wurden.

4. Mit der unter 3. beschriebenen Technik kann man auch die mehrfache Einbindung derselben Datei unterbinden. In älteren Versionen von Visual C++ waren alle Dateien im Verzeichnis *include* sind nach dem folgenden Schema aufgebaut:

```
#ifndef _INC_STDLIB // aus stdlib.h
#define _INC_STDLIB
// Hier kommen die eigentlichen Deklarationen
#endif /* _INC_STDLIB */
```

Hier wird beim ersten Einbinden der Datei ein eindeutiges Makro definiert, das für diese Datei charakteristisch ist. Wenn die Datei dann ein zweites Mal in dieselbe Übersetzungseinheit eingebunden wird (z.B. durch ein *#include* in einer eingebundenen Datei), wird der ganze Block nach *#ifndef* übergangen. Mit solchen **Include-Guards** vermeidet man nicht nur längere Übersetzungszeiten, sondern auch Mehrfachdefinitionen, die zu Fehlermeldungen des Compilers führen. Selbstverständlich funktioniert das nur, wenn die Namen aller so definierten Makros eindeutig sind.

In fast allen C++-Compilern (Visual C++ seit 2003, GCC seit 2006) können mehrfache *#includes* mit

```
#pragma once
```

vermieden werden. Eine Datei, die diese Zeile enthält, wird nur einmal eingebunden, unabhängig davon, in wie vielen *#include*-Anweisungen sie angegeben ist.

Jede Datei, die mit einer *#include*-Anweisung eingebunden werden soll, sollte so geschrieben werden, dass ihre Definitionen nur einmal in eine Übersetzungseinheit (meist eine cpp-Datei) aufgenommen werden. Deklarationen, die keine Definitionen sind, können mehrfach aufgenommen werden.

#### 2.11.4 Pragmas Θ

Jeder Compiler bietet spezifische Möglichkeiten, die nicht im C++-Standard festgelegt sind. Solche Erweiterungen sind z.B. notwendig, damit der Compiler besondere Anforderungen eines Betriebssystems oder Prozessors erfüllen kann. Wenn jetzt jeder Compiler diese Erweiterungen auf seine eigene Art einbauen würde, wären die Programme nicht mehr portabel: Eine Erweiterung des Compilers X wäre beim Compiler Y ein Fehler.

Aus diesem Grund wurden *#pragma* Anweisungen in C und C++ aufgenommen:

```
#pragma Zeichenfolge
```



Damit kann das Verhalten eines Compilers auf eine spezifische Art gesteuert werden. Ist die dabei angegebene Zeichenfolge für den aktuellen Compiler nicht definiert, wird das Pragma ohne Fehler- oder Warnmeldung ignoriert. Das hat den Vorteil, dass Pragmas für einen bestimmten Compiler bei einem anderen Compiler keine Fehlermeldungen auslösen. Allerdings führt schon der kleinste Schreibfehler dazu, dass ein Pragma ohne Warnung überlesen wird.

Für die zahlreichen in Visual C++ definierten Pragmas wird auf die Online-Hilfe verwiesen. Die folgenden Beispiele sollen lediglich die Syntax illustrieren.

### 1. Das Pragma

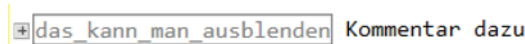
```
#pragma once
```

bewirkt, dass die Header-Datei, in der es enthalten ist, vom Compiler nur einmal gelesen wird.

### 2. Die Pragmas „`#pragma region name`“ und „`#pragma endregion comment`“ begrenzen einen Block im Quelltexteditor, den man auf- und zuklappen kann:

```
#pragma region das_kann_man_ausblenden
int das_will_ich_nicht_immer_sehen = 0;
#pragma endregion Kommentar dazu
```

sieht zugeklappt so aus:



### 3. Gelegentlich möchte man Fehlermeldungen oder Warnungen des Compilers unterdrücken. Beispielsweise gibt Visual C++ bei der Verwendung von C-Funktionen wie `strcpy` eine Fehlermeldung wie in dem Kommentar aus:

```
const char* src = "blablabla";
char dst[10];
strcpy(dst, src); // Fehler'strcpy': This function or variable
// may be unsafe. Consider using strcpy_s instead.
// To disable deprecation, use _CRT_SECURE_NO_WARNINGS.
```

Diese Fehlermeldung ist oft nicht gerechtfertigt. Dann kann man sie durch ein unter *Projekt|Eigenschaften* projektweit definiertes Makro unterbinden:



Da sich projektweit definierte Makros oft auch an anderen Stellen auswirken können, an denen sie nicht erwünscht sind, kann eine deaktivierte Warnung eine Alternative sein:

```
#pragma warning( push )
#pragma warning(disable : 4996) // _CRT_SECURE_NO_WARNINGS
std::strcpy(dst, src);
#pragma warning( pop )
```

Durch das Pragma mit *push* wird der aktuelle Stand der Warnungen gesichert. Dann wird durch *disable* die Fehlermeldung für die nächste Anweisung deaktiviert und durch *pop* wieder der Zustand vor *push* hergestellt.

## Aufgaben 2.11

1. Die Dateien a.h, und b.h sollen die folgenden Definitionen enthalten:

|                       |                           |
|-----------------------|---------------------------|
| a.h                   | b.h                       |
| <pre>int i = 0;</pre> | <pre>#include "a.h"</pre> |
|                       | <pre>int j = i + 1;</pre> |

- a) Welche Anweisungen enthält dann eine Datei c.h mit diesen *#include*-Anweisungen:

```
#include "a.h"
#include "b.h"
```

- b) Wie können Sie die Fehler in a) vermeiden, ohne den Quelltext von b.h oder c.h zu verändern?

## 2.12 Attribute

Attribute ermöglichen eine standardisierte Syntax für Compiler-spezifische Sprach-erweiterungen. Damit werden die GNU Syntax `__attribute__((...))`, die Microsoft Syntax `__declspec()` usw. vereinheitlicht. Attribute, die der Compiler nicht kennt, werden ignoriert.

Attribute werden zwischen doppelten eckigen Klammern angegeben

`[[ attribute-list ]]` (seit C++11)

`[[ using attribute-namespace : attribute-list ]]` (seit C++17)

und können bei nahezu jeder Deklaration (bei Klassendefinitionen, Variablen, Funktionen usw.) stehen.

Gibt man das Attribut `[[deprecated]]` oder `[[deprecated("Meldung")]]` bei der Definition einer Variablen, Funktion usw. an, führt die Verwendung dieser Variablen, Funktion usw. zu einer Warnung.

Beispiel: Ein Aufruf der Funktion

```
[[deprecated]] void f1() {}
[[deprecated("Bitte verwenden Sie f3")]] void f2() {}
```

führt zu der als Kommentar angegebenen Warnung:

```
f1(); // WarnungC4996: 'f1': wurde als veraltet deklariert
f2(); // WarnungC4996:'f2': Bitte verwenden Sie f3
```

Falsch geschriebene Attribute werden vom Compiler nicht bemängelt:

```
[[depprecated]] void f1() {}
```

Mit dem Attribut ***[[nodiscard]]*** bei der Definition einer Funktion oder eines Datentyps gibt der Compiler eine Warnung aus, wenn die Funktion bzw. eine Funktion, die einen Rückgabebetyp des Typs hat, nicht verwendet.

Beispiel: Mit den Definitionen

```
struct[[nodiscard]] error_info{};
error_info starteMaschine() { return error_info(); };

[[nodiscard]] int plus1(int n) { return n + 1; }
int plus2(int n) { return n + 1; }
```

erhält man beim Aufruf der Funktionen die als Kommentar angegebenen Warnungen:

```
starteMaschine(); // Warnung C4834 Der Rückgabewert einer
plus1(17);        // Funktion mit dem "nodiscard" - Attribut
                  // wird verworfen
plus2(17);        // keine Warnung
```

Microsoft hat ***[[nodiscard]]*** bei etwa 2500 Funktionen der STL aufgenommen und weist ausdrücklich darauf hin, dass eine entsprechende Warnung in Hinweis darauf ist, dass die Nichtverwendung des Rückgabewertes sehr wahrscheinlich ein Fehler ist.

Beispiel: Unachtsamkeit kann dazu führen, dass man den Namen einer Funktion nicht richtig interpretiert und z.B. meint, dass die Elementfunktion *empty* einen Vektor löscht. Tatsächlich erreicht man das aber mit *clear*:

```
vector<int> v = { 1,2,3 };
v.empty(); // mit v.clear() verwechselt - nodiscard-Warnung
```

Mit dem Attribut ***[[fallthrough]]*** vor einer *case*-Marke in einer *switch*-Anweisung kann man dem Compiler zu verstehen geben, dass eine fehlende *break*-Anweisung beabsichtigt ist und der Compiler deswegen keine Warnung ausgeben soll:

Beispiel: `void f4(int n)`

```

{
    int result = 0;
    switch (n) {
    case 1:
    case 2:
        result = 1;
        [[fallthrough]];
    case 3: // keine Warnung bei einem fallthrough
        result = 2;
    case 4: // Warnung bei einem fallthrough
        result = 3;
        [[fallthrough]]; // Fehler, da nicht vor einem case label
    }
}

```

Mit dem Attribut `[[maybe_unused]]` bei einer Variable-Definition kann man dem Compiler zu verstehen geben, dass eine fehlende Verwendung der Variablen beabsichtigt ist und der Compiler deswegen keine Warnung ausgeben soll:

Beispiel: `void f5()`

```

{
    int x; // Warnung C4101 "x": Unreferenzierte lokale Variable
    [[maybe_unused]] int y; // keine Warnung
}

```

## 2.13 Der Visual Studio C++ Core Guidelines Checker

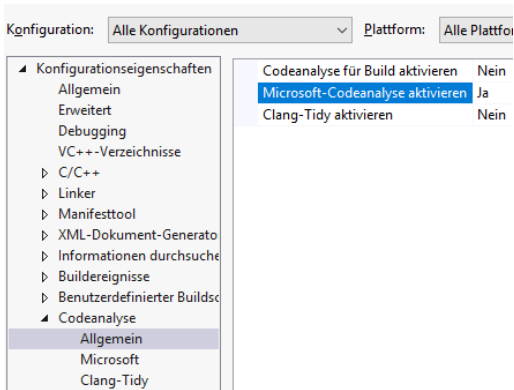
### Die C++ Core Guidelines

<https://github.com/isocpp/CppCoreGuidelines/blob/master/CppCoreGuidelines.md>

sind Empfehlungen von Bjarne Stroustrup, Herb Sutter und weiteren Mitarbeitern, wie man das moderne C++ (C++11/14/17) effektiv nutzen kann und soll. Dabei stehen Ziele wie Einfachheit und Sicherheit im Vordergrund.

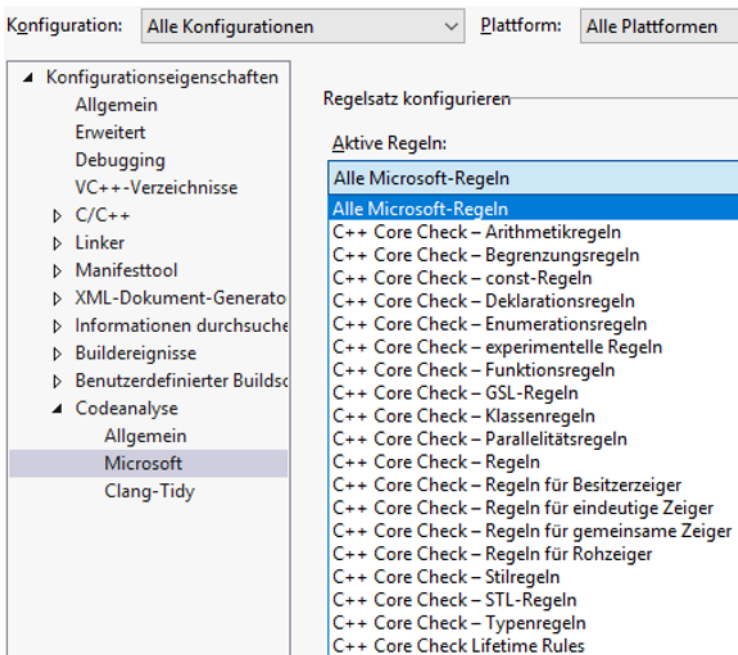
Diese Empfehlungen sind aber nicht nur ein Regelwerk, das man wie viele der klassischen Styleguides lesen und beachten soll, was angesichts des Umfangs oft nicht einfach ist. Vielmehr sollen die Empfehlungen automatisch überprüft werden können.

In Visual Studio 2019 steht dafür der C++ Core Guideline Checker zur Verfügung. Dieser prüft einen Teil der Guidelines, wird aber laufend weiterentwickelt. Er wird unter *Analyisieren*|*Codeanalyse konfigurieren* bzw. *Projekt*|*Eigenschaften*|*CodeAnalyse*|*Allgemein* mit *Microsoft-Codeanalyse* aktiviert:



Aktiviert man hier „Codeanalyse für Build aktivieren“, wird die Codeanalyse bei jedem Erstellen durchgeführt. Da das bei größeren Projekten aber ziemlich lange dauern kann, sollte man hier *Nein* wählen und die Codeanalyse von Zeit zu Zeit manuell starten.

Nach der Aktivierung der Microsoft-Codeanalyse kann man einzelne Regelsätze oder alle (mit *Alle Microsoft-Regeln*) auswählen:



Einige Warnungen (*span<T>*, *not\_null<T>*, *owner<T>* usw.) können mit der Guidelines Support Library (gsl)

<https://www.nuget.org/packages/Microsoft.Gsl/>

vermieden werden. Diese kann mit *Extras|NuGet-Paket-Manager* installiert werden.

Den aktuellen Stand der Visual C++-Regeln findet man hier:

<https://docs.microsoft.com/en-us/visualstudio/code-quality/code-analysis-for-cpp-corecheck>  
<https://docs.microsoft.com/de-de/cpp/code-quality/using-the-cpp-core-guidelines-checkers?view=vs-2019>

Der **Visual Studio Core Guideline Checker** wird mit *Analysieren|Codeanalyse ausführen* gestartet. Die folgenden Beispiele decken nur einen kleinen Teil der über 100 Regeln ab. Sie zeigen, dass er viele Fehler, Schwächen und Verbesserungsmöglichkeiten entdeckt, die leicht übersehen werden:

1. Mit aktivierten Bereichsregeln erhält man für

```
int arr[10];    // Die Variable "arr" ist nicht initialisiert.
int* p = arr;   // Ausdruck "arr": kein Array zu Zeigerverfall
int* q = p + 1; // Verwenden Sie keine Zeigerarithmetik.
int max = 10;
arr[max] = 1;   // Pufferüberlauf beim Schreiben nach "arr"
for (int i = 0; i <= max; i++)
arr[i] = i;     // hier wird i=10 nicht als Pufferüberlauf gemeldet
```

2. Mit aktivierten const-Regeln erhält man

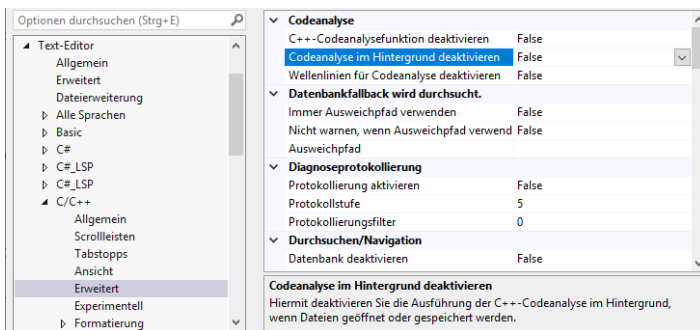
```
int plus1(int i) // "plus1" kann als "constexpr" markiert werden
{               // "plus1" kann als "noexcept" deklariert werden
    return i + 1;
}

int use_const(std::string& s, const char* p)
{ // Das Referenzargument "s" kann "const" gekennzeichnet werden
    int x = 7; // Die Variable "x" wird nur einmal zugewiesen,
    const int y = plus1(1);           // markieren Sie sie als const
    return x + y;
}
```

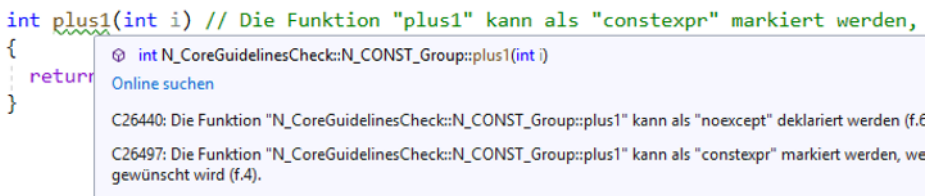
3. Mit aktivierten "C++ Core Check Lifetime Rules" werden die „Lifetime Profile“ Regeln innerhalb einer Funktion (nicht global) überprüft.

```
int* p = nullptr;
{
    int x = 17;
    p = &x;
}
return *p; //Potenziell ungültigen Zeiger *p nicht dereferenzieren
```

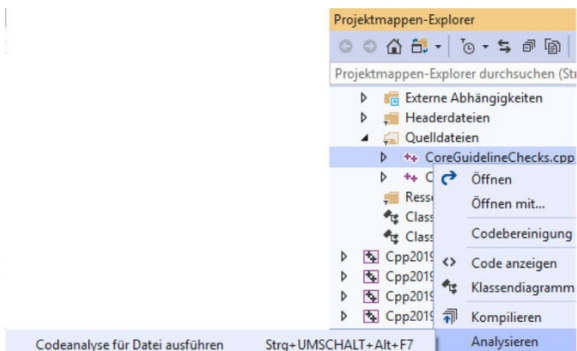
Unter *Extras|Optionen* kann man die Codeanalyse auch im Hintergrund durchführen lassen. Bei größeren Programmen kann Visual Studio dabei aber ziemlich langsam werden:



Aktiviert man hier “Wellenlinien ...“, werden die Verletzungen der Guidelines im Quelltext mit grünen Wellenlinien unterlegt und in einem Fenster angezeigt, wenn man mit dem Mauscursor über die Wellenlinie fährt:



Eine cpp-Datei kann man auch über das Kontextmenü zur Datei im Projektmappen-Explorer analysieren:



Die Nummern der Regeln und die zugehörigen Meldungen findet man in

```
#include <CppCoreCheck/Warnings.h>
```

## 2.14 Module (C++20)

C++ verwendet immer noch das noch aus den Anfangszeiten von C stammende Konzept der Header-Dateien, um Quelltexte in ein Programm aufzunehmen. Diese werden mit einer *#include*-Anweisung wie

```
#include <iostream>
```

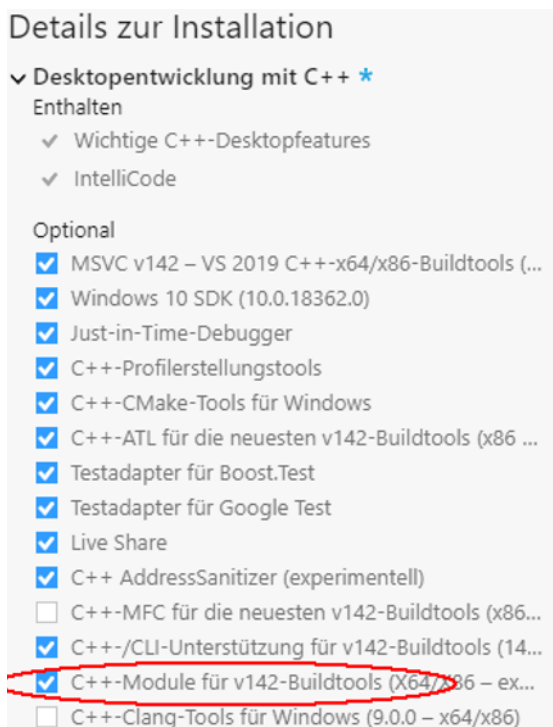
in eine Übersetzungseinheit eingebunden, was insbesondere zur Folge hat, dass diese Quelltextdatei jedes Mal neu übersetzt werden muss. Andere Programmiersprachen verwenden schon seit langem vorkompilierte Module: Diese reduzieren den Aufwand für den Compiler und ermöglichen bessere Überprüfungen.

Solche Module wurden inzwischen in den nächsten Standard C++20 aufgenommen. In Visual Studio steht seit der Version 2017 eine erste Unterstützung zur Verfügung. Diese ist aber noch experimentell und war am Anfang auch noch ziemlich eingeschränkt. Im Lauf der Zeit wurde sie aber immer wieder erweitert.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die Version 16.5 von Visual Studio 2019 (Februar 2019). Auch diese Version hat noch zahlreiche Schwächen und meldet unnötig doppelte Symbole. Es aber zu erwarten, dass diese Schwächen beseitigt sind, wenn Sie dieses Buch lesen.

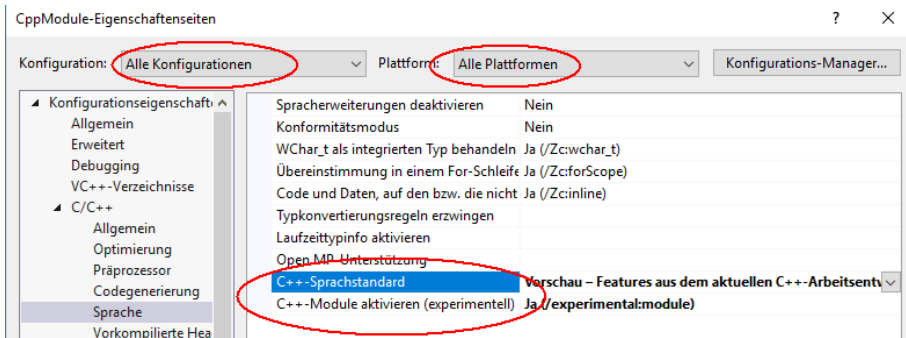
### 2.14.1 Installation und Einstellungen für Module in Visual Studio 2019 16.5

Damit die Module der Standardbibliothek verfügbar sind, müssen diese mit dem Visual Studio Installer installiert werden:





Außerdem muss unter *Projekt*|*Eigenschaften* der aktuelle Sprachstandard auf die Vorschau-Features und die Aktivierung der Module für alle Konfigurationen und Plattformen eingestellt werden:



### 2.14.2 Die Standardbibliothek als Modul verwenden

Nach diesen Vorbereitungen kann man die `#include`-Anweisungen für die wichtigsten Header der Standardbibliothek wie z.B.

```
#include <iostream>
#include <vector>
```

durch

```
import std.core; // in der cpp-Datei, nicht in den .h-Dateien
```

in der Übersetzungseinheit ersetzen: Ein einziges `import` in der `cpp`-Datei reicht, die `#include`-Anweisungen in jeder Header-Datei sind dann nicht mehr notwendig.

Außerdem sollen auch einzelne Teile der Standardbibliothek importiert werden können. Das ist aber derzeit noch nicht möglich:

```
import <iostream>;
import <vector>;
```

Beispiel: Nach

```
import std.core;
```

kann man die Standardbibliothek genauso verwenden

```
void test_module()
{
    // using namespace std; - Probleme in der Vorabversion
    std::vector<int> v = { 1,2,3 };
    for (const auto& i : v)
        std::cout << i << std::endl;
    std::cout << "Hello World!\n";}
```

wie nach *#include*-Anweisungen wie

```
#include <iostream>
#include <vector>
```

Allerdings führen in der Vorabversion *using*-Direktiven immer wieder zu falschen Fehlermeldungen über doppelte Symbole.

Einige weniger häufig gebrauchte Header entsprechen spezielle *import*-Angaben:

```
import std.regex;           // #include <regex>
import std.filesystem;     // #include <filesystem>
import std.memory;         // #include <memory>
import std.threading;      // #include <atomic>, <condition_variable>,
                           <future>, <mutex>, <shared_mutex>, and <thread>
import std.core;           // #include alles andere aus der C++ Standard Library
```

Offensichtlich ist die Verwendung von Modulen einfach und hat viele Vorteile. Nur einige Beispiele:

- Bei mit *#include* eingebundene Header-Dateien können kleine Syntaxfehler zu horrenden Fehlermeldungen führen, z.B. wenn eine geschweifte Klammer vergessen wurde. Diese Gefahr ist mit Modulen viel geringer.
- Die Liste der benötigten *#include*-Anweisungen kann ziemlich lang werden
- Mit Modulen sind keine *#include*-guards mehr notwendig

Deswegen empfiehlt es sich, Module gegenüber *#include*-Anweisungen zu bevorzugen, wenn Sie mit einem Compiler arbeiten, der Module unterstützt.

### 2.14.3 Module definieren

Selbstverständlich können auch eigene Module definiert werden. Das ist aber mit der Visual Studio Version 16.5 von Februar 2020 nur über die Kommandozeile (*Extras|Befehlszeile|-Developer Eingabeaufforderung*) möglich und nicht in Visual Studio. Deswegen hier nur ein kurzes Beispiel.

Eine **Modul-Definition** muss als Datei mit der Namensendung *.ixx* angelegt werden, weil diese Endung für den Compiler ein Hinweis auf die C++ Modul Syntax ist.

Die Moduldefinitionsdatei muss mit dem Schlüsselwort *module* beginnen und von dem Namen des Moduls gefolgt werden. Im Modul werden die Definitionen, die mit *export* gekennzeichnet sind, exportiert. Sie können in einer anderen Datei verwendet werden, die das Modul importiert.

```
// Dateiname Modul1.ixx
```

```
// Auf der Kommandozeile kompilieren mit
//      cl /EHsc /std:c++latest /experimental:module /c modul1.ixx
export module Modul1;
namespace N
{
    export int f() { return 17; };
    double nicht_exporiert() { return 18; } // wird nicht exportiert
    export int y=18;
    export const int z=19;

    export {
        class C
        {
            int x,y;
        public:
            C(int x_, int y_):x(x_), y(y_){}
            int get() {return x+y;}
        };
    }
}
```

Durch die Kompilation dieser Datei auf der Kommandozeile mit dem als Kommentar angegebenen Befehl werden zwei Dateien erzeugt: **modul1.ifc** und **modul1.obj**.

Dieses Modul kann wie hier verwendet werden:

```
// Datei CppModules.cpp mit der Funktion "main", Projekt Debug x86

// Auf der Kommandozeile kompilieren mit
// cl /EHsc /std:c++latest /experimental:module /module:reference
//      modul1.ifc modul1.obj CppModules.cpp

import Modul1;
#include <iostream>

int main()
{
    std::cout << "Hello Module!\n";
    N::C x(4, 5);

    std::cout << N::f() << " " << x.get() << " " << " " << N::y << " "
              << N::z << std::endl;
}
```

Dieses Beispiel zeigt, wie Funktionen, Variable, Konstanten und Klassen aus dem Modul verwendet werden können. Kompiliert man diese cpp-Datei mit dem am Anfang angegebenen Befehl, wird eine exe-Datei erzeugt, bei deren Ausführung

```
Hello Module!
17 9  18 19
```

angezeigt wird.

## 2.15 Compiler Feature Test Makros

Seit C++20 gibt es zahlreiche Makros, mit denen man prüfen kann, ob ein Compiler bestimmte Features zur Verfügung stellt. Damit kann man diese Möglichkeiten in einer bedingten Kompilation dann verwenden, wenn sie verfügbar sind, und eine Fehlermeldung vermeiden, wenn sie nicht verfügbar sind.

### 2.15.1 Der Präprozessorkonstanten-Ausdruck `__has_include`

Dem Präprozessor-Konstantenausdruck `__has_include`

```
__has_include ( " filename " )
__has_include ( < filename > )
```

kann man mit derselben Syntax wie bei `#include` einen Dateinamen übergeben. Er hat dann den Wert 1, wenn die Datei existiert, und 0 falls nicht. Damit kann man prüfen, ob eine Datei vorhanden ist, die mit `#include` eingebunden werden soll.

Beispiel: Manche Compiler stellen neue Header zunächst in einer Vorabversion im Verzeichnis „experimental“ zur Verfügung. In der endgültigen Version werden sie dann in das „richtige“ Verzeichnis übernommen:

```
#if __has_include(<filesystem>)
    #include <filesystem> // in VS 2017 nur ein #include
                           <experimental/filesystem>

    #define HAVE_FILESYSTEM 1
#elif __has_include(<experimental/filesystem>)
    #include <experimental/filesystem>
    #define HAVE_FILESYSTEM 1
    #define HAVE_FILESYSTEM_EXPERIMENTAL 1
#elif __has_include(<boost/filesystem.hpp>)
    #include <boost/filesystem.hpp>
    #define HAVE_FILESYSTEM 1
    #define HAVE_FILESYSTEM_BOOST 1
#else
    #define HAVE_FILESYSTEM 0
#endif
```

### 2.15.2 Die `__cpp_xxx`-Makros

Für eine Vielzahl von Sprachelementen, die seit C++11 eingeführt wurden, kann man mit einem Makro wie aus

| Makro                              | Sprachelement   | Wert   | C++-Version |
|------------------------------------|-----------------|--------|-------------|
| <code>__cpp_binary_literals</code> | binäre Literale | 201304 | C++14       |
| <code>__cpp_lambdas</code>         | Lambda-Ausdruck | 200907 | C++11       |
| <code>__cpp_modules</code>         | Module          | 201907 | C++29       |

prüfen, ob es der aktuelle Compiler unterstützt. Diese Liste ist nur ein kleiner Auszug aus

[http://en.cppreference.com/w/cpp/experimental/feature\\_test](http://en.cppreference.com/w/cpp/experimental/feature_test)

Beispiel: Mit Anweisungen wie

```
#if __cpp_constexpr >= 201304
# define CONSTEXPR constexpr
#else
# define CONSTEXPR
#endif
```

kann man ein Programm auf ein neues Sprachelement vorbereiten, auch wenn es noch nicht vorhanden ist.

### 2.15.3 `__has_cpp_attribute`

Ob ein Attribut definiert ist, kann man mit `__has_cpp_attribute` prüfen.

Beispiel:

```
#ifdef __has_cpp_attribute//Prüfe, ob es __has_cpp_attribute
                                gibt
#   if __has_cpp_attribute(deprecated) // Prüfe, ob es ein
                                bestimmtes Attribut gibt
#       define DEPRECATED(msg) [[deprecated(msg)]]
#   endif
#endif
#ifdef DEPRECATED
#   define DEPRECATED(msg)
#endif
```

### 3 Die Stringklassen: *string*, *wstring* usw.

In C und auch in vielen C++-Programmen werden Strings traditionellerweise mit nullterminierten Strings (Datentyp *char\**, siehe Abschnitt 6.6) dargestellt. Allerdings ist die Arbeit damit ziemlich umständlich und fehleranfällig. So kann man einen nullterminierten String nicht einfach mit dem Zuweisungsoperator „=“ auf einen anderen kopieren, und bei Funktionen wie *strcpy* muss man immer darauf achten, dass die Quelle auf einen nullterminierten String zeigt und im Zielbereich genügend Speicher reserviert ist.

**Stringklassen** haben gegenüber nullterminierten Strings **viele Vorteile**. Zu den wichtigsten Vorteilen gehört, dass sie bei ihren Operationen den notwendigen **Speicher automatisch reservieren**. Das vermeidet viele Fehler, die durch eine unzureichende Reservierung von Speicherplatz entstehen können. Deshalb ist die Arbeit mit Stringklassen viel einfacher und weniger fehleranfällig.

Die Stringklassen der C++-**Standardbibliothek** können nach

```
#include <string> // oder import std.core; (siehe Abschnitt 2.13)
```

verwendet werden. Diese *#include*-Anweisung muss außerhalb eines Namensbereichs und auch außerhalb einer Klasse stehen. Nach dieser *#include*-Anweisung stehen die Stringklassen unter dem Namen *std::string* usw. zur Verfügung:

```
std::string s1 = "123";  
std::wstring s2 = L"123"; // L"..." ist ein wchar_t-Literal
```

Nach

```
using std::string; // bzw. using namespace std;
```

kann man „std:“ auch weglassen:

```
string s1 = "123";  
wstring s2 = L"123";
```

Ein *string* besteht aus Zeichen des Datentyps *char*, und ein *wstring* aus Multibyte-Zeichen des Datentyps *wchar\_t*. Bis zu Visual Studio 2013 waren *string* und *wstring* die einzigen Stringklassen. Ab Visual Studio 2015 kamen dann die Unicode-Stringklassen dazu (siehe Abschnitt 3.5). Da *wstring* und die Unicode-Stringklassen im Wesentlichen genau wie die Klasse *string* benutzt werden können, wird auf sie zunächst nicht weiter eingegangen.

Am Beispiel der Klasse *string* werden auch zwei grundlegende Erweiterungen von Klassentypen gegenüber den fundamentalen Datentypen (wie z.B. *int*) vorgestellt:

- Variablen eines Klassentyps können bei ihrer **Definition** nicht nur mit dem Operator = wie in „`int x=17;`“ initialisiert werden, sondern auch **mit Argumenten**, die in Klammern nach dem Namen der Variablen angegeben werden.
- Klassen haben **Elementfunktionen**, die mit einer Variablen eines Klassentyps aufgerufen werden können.

Da diese Möglichkeiten bei allen Klassen bestehen, ist dieses Kapitel auch eine Einführung in die Arbeit mit Variablen eines Klassentyps.

Die Klasse *string* ist intern als Klassen-Template (siehe Abschnitt 14.2) mit dem Namen *basic\_string* definiert. Deshalb findet man sie in der Online-Hilfe und in der Header-Datei „`include\string`“ auch unter dem Namen *basic\_string*. Hier ist *basic\_string* ein anderer Name für *string* und *charT* bzw. *\_Elem* ein anderer Name für *char*.

### 3.1 Die Definition von Variablen eines Klassentyps

Klassen sind Datentypen und können deshalb zur Definition von Variablen verwendet werden. Eine Variable, deren Datentyp eine Klasse ist, wird auch als Klasseninstanz oder Objekt bezeichnet.

Eine *string*-Variable kann mit dem Operator „`=`“ und einem String-Literal definieren. Traditionellerweise hat das Literal „...“ den Datentyp *const char\**.

Beispiel: Die folgenden Anweisungen initialisieren einen *string* mit einem *string*-Literal, einem *string* und einem Zeiger auf einen nullterminierten String:

```
string s1 = "Hallo Welt"; // Literal des Typs const char*
string s2 = s1;           // string
const char* pc = "Hallo Mond";
string s3 = pc; // Zeiger auf nullterminierten String
```

Bei einem *wstring* muss ein *wstring*-Literal bzw ein *wchar\_t*-Zeiger verwendet werden:

```
wstring w = L"Hallo Mars"; // wstring-Literal
```

Seit C++14 kann man mit dem nach

```
using namespace std::literals::string_literals; // ab C++14
```

verfügbaren Postfix *s* auch Literale angeben, die den Datentyp *std::string* haben.

Beispiel: Mit einem *s* nach „...“ erhält man ein Literal des Datentyps *std::string*:

```

auto s4 ="Die Schwerkraft des Sterns"; // const char* s4
using namespace std::literals::string_literals;
auto s5 ="zieht alles an von nah und fern"s;//std::string s5

```

**Konstruktoren** ermöglichen die Initialisierung einer Variablen eines Klassentyps mit Argumenten, die bei der Definition der Variablen angegeben werden. Ein Konstruktor ist dadurch gekennzeichnet, dass er demselben Namen wie die Klasse hat, und außerdem Parameter wie eine Funktion haben kann. Er wird dann bei der Definition der Variablen aufgerufen, wenn nach ihrem Namen Argumente angegeben werden, die zu den Parametern passen. Falls keine zu genau einem Konstruktor passenden Argumente angegeben werden, ist eine Fehlermeldung des Compilers die Folge.

Die Klasse *string* enthält unter anderem die folgenden Konstruktoren:

```

class string // vereinfacht
{
    ...
    explicit string();
    // erzeugt einen leeren String
    string(const string& str, size_type pos = 0, size_type n=npow);
    // string(str) erzeugt einen String als Kopie von str
    // string(str,pos) erzeugt ab Position pos eine Kopie von str
    // string(str,pos,n) ab Position pos eine Kopie von str mit
                                maximal n Zeichen
    string(const char* s, size_type n);
    // erzeugt einen String aus den ersten n Zeichen eines
                                nullterminierten Strings
    string(const char* s);
    // erzeugt einen String aus einem nullterminierten String
    string(size_type n, char c);
    // erzeugt einen String mit n Zeichen c
    ...
}

```

Wie eine Funktion

- kann ein Konstruktor **Default-Argumente** (siehe Abschnitt 2.4.8) haben. Das sind Werte, die nach einem Parameter und „=“ angegeben werden. Für einen Parameter mit einem Default-Argument muss man beim Aufruf kein Argument angeben. Der Compiler verwendet dann das Default-Argument.
- kann ein Konstruktor **überladen** werden (siehe Abschnitt 2.4.3). Viele Klassen haben wie *string* mehrere Konstruktoren, die sich im Datentyp der Parameter unterscheiden. Dann müssen bei der Definition einer Variablen Argumente angegeben werden, die zur Parameterliste genau eines Konstruktors passen.

Die *string*-Konstruktoren ermöglichen insbesondere, einen String aus einem anderen String oder aus einem nullterminierten String zu konstruieren.

Beispiel: Die folgenden Definitionen der Stringvariablen sind mit den Konstruktoren von oben möglich.



```

string s0;           // initialisiert s0 mit "" (leerer
String)
string s1("456");    // initialisiert s1 mit "456"
string s2(s1);       // initialisiert s2 mit s1
string s3("0123456",2,3); // initialisiert s3 mit "234"
string s4(5, '-');   // initialisiert s4 mit "-----"

```

## 3.2 Einige Elementfunktionen der Klasse *string*

Funktionen, die in einer Klasse definiert sind, werden als **Elementfunktionen** bezeichnet. Der Aufruf einer Elementfunktion erfolgt dann dadurch, dass man den Namen der Funktion nach dem Namen der Stringvariablen und einem Punkt „.“ angibt.

Die Klasse *string* enthält zahlreiche Elementfunktionen für viele häufig benötigte Operationen. Außerdem können viele Algorithmen der Standardbibliothek wie globale Funktionen mit Argumenten des Datentyps *string* aufgerufen werden. Diese Funktionen verwenden oft den Datentypen *size\_type* und den Wert *npos*: *size\_type* ist ein Ganzzahldatentyp ohne Vorzeichen und *npos* der größte Wert von *size\_type*. Diese beiden Bezeichner können nicht direkt verwendet werden, sondern nur in der relativ umständlichen Schreibweise *string::size\_type* bzw. *string::npos*. Der Unterschied von *size\_type* und *int* wirkt sich nur bei Strings mit mehr als  $2^{31}-1$  Zeichen aus.

Im Folgenden werden einige der wichtigsten Funktionen der Klasse *string* vorgestellt. Viele haben weitere überladene Varianten mit denselben Namen (siehe Abschnitt 7.2) und verwenden Default-Argumente (siehe Abschnitt 2.4.8). Praktisch alle diese Funktionen stehen auch für *wstring* und Unicode-Strings zur Verfügung: Die Signatur dieser Funktionen erhält man dann, indem man *string* durch *wstring* usw. ersetzt.

Mit den Funktionen

```

size_type size() const noexcept;
size_type length() const noexcept;

```

erhält man die Länge eines Strings. Beide liefern dasselbe Ergebnis.

Beispiel: 

```
string s0 = "abc";
int j = s0.size(); // 3
int k = s0.length(); // 3
```

Mit den zahlreichen überladenen *insert*-Funktionen kann man Zeichen in einen *string* einfügen:

```

string& insert(size_type pos, const string& str);
string& insert(size_type pos, const char* s);

```

Diese beiden Funktionen fügen ab der Position *pos* (Index *pos-1*) das letzte Argument ein. Wie bei diesen beiden *insert*-Funktionen gibt es für viele *string*-Funktionen überladene Varianten für *char\** und *string*-Parameter.

Der Aufruf dieser Funktionen verändert den String, dessen Elementfunktion aufgerufen wird. Dasselbe Ergebnis erhält man auch über den Rückgabewert. Da diese Funktionen einen *string&* zurückgeben, kann man sie auch verkettet aufrufen.

Beispiel: Mit dem Aufruf einer Funktion erhält man dasselbe Ergebnis wie mit dem Rückgabewert:

```
string s0 = "abc", s1 = s0, s2 = s0;
s1.insert(1, "12");           // s1 = "a12bc"
s2 = s2.insert(1, "12");      // s2 = "a12bc"
```

Anstelle von mehreren aufeinanderfolgenden Aufrufen

```
string s3 = s0;
s3.insert(1, "1");
s3.insert(3, "2"); // s3 = "a1b2c"
```

ist auch ein verketteter Aufruf möglich:

```
string s3 = s0;
s3.insert(1, "1").insert(3, "2"); // s3 = "a1b2c"
```

Die überladene Variante

```
string& insert(size_type pos1, const string& str, size_type pos2, size_type n);
```

fügt ab Position *pos1* (Index *pos1*-1) maximal *n* Zeichen von *str* ab *pos2* ein. Die Variante für *char\** fügt maximal *n* Zeichen ein:

```
string& insert(size_type pos, const char* s, size_type n);
```

Ein Zeichen *c* wird *n* mal an der Position *pos* eingefügt mit:

```
string& insert(size_type pos, size_type n, char c);
```

Beispiel: 

```
string s4 = "abc", s5 = s4;
s4.insert(2, "01234", 3, 2); // s4 = "ab34c"
s5.insert(2, 5, '*');        // s5 = "ab*****c"
```

Da diese Funktionen nicht mit *noexcept* gekennzeichnet sind, können sie eine Exception auslösen und sollten deshalb in einer *try*-Anweisung aufgerufen werden. Falls *pos > size()* oder der resultierende String die maximal zulässige Länge überschreitet, wird eine Exception ausgelöst. Damit die folgenden Beispiele nicht zu umfangreich werden, wird auf diese try-Anweisung aber oft verzichtet. Das heißt aber nicht, dass Sie auch in Ihren Anwendungen darauf verzichten sollen.

Beispiel: 

```
try
{
    string s6 = "abc";
    s6.insert(7, "s6 ist nicht 7 Zeichen lang");
}
```

```

catch (std::exception& e)
{
    cout << "Exception " << e.what() << endl; // Exception
                                              invalid string position
}

```

Sowohl *insert* als auch die im Folgenden vorgestellten Funktionen haben zahlreiche weitere überladene Varianten, die hier nicht alle vorgestellt werden.

Die Elementfunktion *erase* entfernt ab der Position *pos* maximal *n* bzw. *length()-pos* Zeichen:

```
string& erase(size_type pos = 0, size_type n = npos);
```

Beispiel: `try`

```

{
    string s1 = "1234567890", s2 = s1, s3 = s1, s4 = s1;
    s1.erase(3, 2); // s1="12367890"
    s2.erase(3, 10); // s2="123"
    s3.erase(3); // s3="123"
    s4.erase(); // s4=""
}
catch (std::exception& e)
{
    cout << "Exception " << e.what() << endl;
}

```

*replace* ersetzt ab der Position *pos* maximal *n1* **Zeichen** durch den String *str*:

```
string& replace(size_type pos, size_type n1, const string& s);
```

Beispiel: `try`

```

{
    string s = "1234567890", s1 = s, s2 = s, str = "abc";
    s.replace(3, 2, str); // s = "123abc67890"
    s1.replace(3, 5, str); // s1 = "123abc90"
    s2.replace(8, 5, str); // s2 = "12345678abc"
}
catch (std::exception& e)
{
    cout << "Exception " << e.what() << endl;
}

```

Den **Teilstring** mit maximal *n* Zeichen ab dem Index *pos* erhält man mit:

```
string substr(size_type pos = 0, size_type n = npos) const;
```

Für *pos+n > length* wird der Rest des Strings zurückgegeben. Falls beim Aufruf dieser und der folgenden Funktionen nicht *pos < length()* gilt, wird eine Exception ausgelöst.

Beispiel: `try`

```
{
    string s = "1234567";
    string s2 = s.substr(3, 2); // s2="45"
    string s3 = s.substr(3, 9); // s3="4567"
    string s4 = s.substr(3);    // "4567", wie s.substr(3,npos)
    string s5 = s.substr();     // s5=s, wie s.substr(0,npos);
}
catch (std::exception& e)
{
    cout << "Exception " << e.what() << endl;
}
```

Die Elementfunktionen *find* suchen nach dem ersten Vorkommen eines **Teilstrings** *str* ab dem Index *pos* und geben seine Position zurück, falls er gefunden wird. Wenn er nicht gefunden wird, ist der Funktionswert *string::npos*. Die Funktion *find* kann auch ohne Argument für *pos* aufgerufen werden. Dann wird der Teilstring ab der Position 0 gesucht.

```
size_type find(const string& str, size_type pos = 0) const noexcept;
```

Mit

```
size_type rfind(const string& str, size_type pos = npos) const noexcept;
```

wird der Teilstring ausgehend von der letzten Position gesucht.

Beispiel: Bei *i1* wird das erste und bei *i2* das zweite Auftreten von "45" gesucht:

```
string s = "1234512345"; // Da noexcept kein try
int i1 = s.find("45");    // i1 = 3
int i2 = s.find("45", i1 + 1); // i2 = 8
int i3 = s.find("ab");    // i3 = string::npos
int i4 = s.rfind("45");   // i4 = 8
```

Damit kann man einen String in Bestandteile zerlegen:

```
string fn = "config.sys";
int p = fn.find(".");
string n = fn.substr(0, p); // n = "config"
string e = fn.substr(p + 1); // e = ".sys"
```

Ob ein String mit einer bestimmten Zeichenfolge beginnt oder endet, erhält man mit den Funktionen

```
constexpr bool starts_with(string sv) noexcept; // ab C++20
constexpr bool ends_with(string sv) noexcept;
```

Das *i*-te Zeichen eines *string* erhält man mit dem Ausdruck `[i]` nach dem Namen der Variablen sowie mit der Elementfunktion *at*. Die einzelnen Zeichen sind mit **0..n-1** nummeriert, wenn der String *n* Zeichen lang ist:

Beispiel: Die Funktion

```
string ErsetzePunktDurchKomma(string s)
{
    for (int i = 0; i < s.length(); i++)
        if (s[i] == '.')
            s[i] = ',';
    return s;
}
```

ersetzt jeden Punkt im Argument durch ein Komma:

```
string s1 = ErsetzePunktDurchKomma("3.14"); // s1 = "3,14"
```

Gibt man bei `s[i]` einen Index `i` an, der nicht zwischen 0 und `n-1` liegt, kann das zu einer Zugriffsverletzung und einem Programmabbruch führen. Eine Exception wird dabei aber nie ausgelöst. Einen solchen Programmabbruch kann man mit der Elementfunktion **at** verhindern. Damit wird bei einem unzulässigen Index eine Exception ausgelöst.

Beispiel: Ersetzt man die *if*-Anweisung im letzten Beispiel durch

```
if (s.at(i) == '.')
    s.at(i) = ',';
```

erhält man dasselbe Ergebnis. Dann sollte man diese Funktion aber in einer *try-catch*-Anweisung aufrufen.

Mit dem **Operator** `+` können Strings verkettet („aneinander gehängt“, „zusammengeklebt“) werden. Das Ergebnis ist dann der String, in dem auf die Zeichen des linken Operanden die des rechten folgen.

Beispiel: Mit

```
string s1 = "x=", s2 = "17";
int x = 17;
string r1 = s1 + s2;
string r2 = s1 + to_string(x);
```

erhalten `r1` und `r2` den Wert „x=17“.

Mindestens einer der beiden Operanden muss den Datentyp *string* haben. Der andere kann ein Zeiger auf einen nullterminierten String (Datentyp *char\**) sein.

Beispiel: Die nächste Anweisung wird nicht akzeptiert, da die beiden Operanden den Datentyp *const char\** haben und für Zeiger keine Addition definiert ist:

```
string r3 = "x=" + "17"; // Fehler: Zeiger können nicht
                        // addiert werden
```

Mit einem Operanden des Datentyps *string* ist der Operator `+` aber möglich:

```
string r4 = string("x=") + "17";
string r5 = "x="s + "17";
```

Die folgende Funktion fügt 1000 Strings mit je 1000 Zeichen zu einem einzigen String zusammen:

```
string LangerString()
{
    string s10 = "0123456789", s1K,s1M; //s10: 10 Zeichen lang
    for (int i = 1; i <= 100; i++)
        s1K = s1K + s10; // s1K: ein String mit 1000 Zeichen
    for (int i = 1; i <= 1000; i++)
        s1M = s1M + s1K; // s1M: ein String mit 1000000 Zeichen
    return s1M;
}
```

Mit dem Operator += kann ein String an einen String angehängt werden. Dieser Operator ist oft mit etwas weniger Schreibaufwand verbunden und ist außerdem oft deutlich schneller der Operator + (siehe die Benchmarks auf den nächsten Seiten).

Beispiel: Die letzten beiden Anweisungen in

```
string s1 = "123";
string s2 = s1 + "abc"; // s2 = "123abc"
s1 += "abc"; // s1 = "123abc"
```

haben dasselbe Ergebnis. Ersetzt man in der Funktion *LangerString* die Anweisungen

```
s1K = s1K + s10; // s1K: ein String mit 1000 Zeichen
s1M = s1M + s1K; // s1M: ein String mit 1000000 Zeichen
```

durch

```
s1K += s10; // s1K: ein String mit 1000 Zeichen
s1M += s1K; // s1M: ein String mit 1000000 Zeichen
```

erhält man dasselbe Ergebnis. Die Benchmarks auf den nächsten Seiten zeigen aber, dass die Operationen mit += deutlich schneller sind.

Für das **Anhängen von Zeichen** stehen neben den Operatorfunktionen += auch Elementfunktionen mit dem Namen *append* zur Verfügung. Einige dieser Funktionen sind gleichwertig zu +=, andere sind etwas vielseitiger. In der Praxis werden sie aber nur selten eingesetzt.

Intern werden Strings der Klasse *string* als nullterminierter String dargestellt (siehe Abschnitt 6.6). Die Elementfunktion *c\_str()* liefert einen Zeiger auf das erste Zeichen dieses nullterminierten Strings. Mit ihr können Strings auch als Argumente an Funktionen übergeben werden, die nullterminierte Strings erwarten.

```
void show(const char* s)
{
    cout << s << endl;
}
```

und einem *string* *s* der folgende Aufruf nicht möglich:

```
show(s);
```

Mit der Funktion *c\_str* kann ein String auch einer solchen Funktion übergeben werden:

```
show(s.c_str());
```

Mit den **Vergleichsoperatoren** *<*, *<=*, *>*, *>=*, *==* und *!=* (für *≠*) können Strings miteinander verglichen werden. Das Ergebnis eines solchen Vergleichs ergibt sich dabei aus der lexikographischen Anordnung der einzelnen Zeichen: Sind die beiden Strings gleich lang, werden die einzelnen Zeichen ausgehend vom ersten miteinander verglichen. Die ersten Zeichen, in denen sich die beiden unterscheiden, entscheiden dann aufgrund ihrer Anordnung im ASCII-Zeichensatz über das Ergebnis des Vergleichs. Sind die beiden Strings dagegen verschieden lang, wird im Prinzip genauso vorgegangen. Allerdings wird jedes Zeichen ab der Länge des kürzeren Strings im längeren String höher bewertet.

Beispiel: Für die drei Strings

```
string s1 = "Halli";
string s2 = "Hallo";
string s3 = "Hall";
```

sind die folgenden Bedingungen erfüllt:

```
s1 < s2:  s1 und s2 unterscheiden sich erstmals im 5. Zeichen. Aus s1[4] <
          s2[4] folgt das Ergebnis.
s3 < s2:  s3 ist nur 4 Zeichen lang. Bis zur Position 3 sind beide gleich.
```

Die folgende Tabelle enthält die Ausführungszeiten für die Anweisungen unter 1. bis 3.

1. Ein Aufruf einer Funktion wie *LangerString* (siehe Seite 209), bei dem ein *string* der Länge 1 MB (Spalte 1), 10 MB (Spalte 2), ein *wstring* (Spalte 3) und ein *u16string* (Spalte 4) erzeugt wurde. Die Unterschiede:

- Die Strings wurden mit *s=s+a* zusammengefügt.
- Die Strings wurden mit *s+=a* zusammengefügt.
- Wie in b), aber mit einem Aufruf von *reserve*, um den notwendigen Speicher im Voraus zu reservieren:

```
string LangerString_c()
{
    string s10,s1K,s1M;
    s1K.reserve(1000);
```

```
s1M.reserve(1000000);
// Rest wie oben
```

2. In einem 1 bzw. 10 MB langen String (von Aufgabe 1) wird jede Zeichenfolge "234" durch "bcde" ersetzt. Dazu werden die folgenden Operationen in einer Schleife verwendet, in der mit *find* die Position von "234" bestimmt wird. Alle drei Operationen haben dasselbe Ergebnis.

- a) `s.erase(p, 3);`  
     `s.insert(p, "bcde");`  
 b) `s.replace(p, 3, "bcde");`

Die Laufzeiten zeigen, dass eine Funktion der Standardbibliothek (wie hier *replace*) oft schneller ist als selbstgestrickte Algorithmen wie in a) oder b).

3. a) Jede der über 6000 Zeilen von Goethes Faust aus einer Datei einlesen und jede Zeile mit der Funktion *tokenize* (meine Lösungen der Aufgaben 3.2.2 und 4.2.3, 3.) in Wörter zerlegen und jedes Wort in ein *set* ablegen  
 b) Jede Zeile wie in a) einlesen und zerlegen und jedes Wort im *set* von a) suchen

| Benchmarks Visual Studio 2019.5, Release x64 /O2 |                   |                     |                     |                       |
|--------------------------------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
|                                                  | <i>string</i> 1MB | <i>string</i> 10 MB | <i>wstring</i> 1 MB | <i>u16string</i> 1 MB |
| 1. a) <code>s = s + a</code>                     | 0,0350 Sek.       | 24 Sek.             | 0,3500 Sek.         | 0,3500 Sek.           |
| b) <code>s += a</code>                           | 0,0011 Sek.       | 0,015 Sek.          | 0,0025 Sek.         | 0,0025 Sek.           |
| c) <code>+=, reserve</code>                      | 0,0001 Sek.       | 0,005 Sek.          | 0,0008 Sek.         | 0,0008 Sek.           |
| 2. a) <code>erase,insert</code>                  | 2,7 Sek.          | 560 Sek.            | 5,8 Sek.            | 5,8 Sek.              |
| b) <code>replace</code>                          | 1,7 Sek.          | 316 Sek.            | 5,8 Sek.            | 5,8 Sek.              |
| 3. a)                                            | 0,01 Sek.         |                     |                     |                       |
| b)                                               | 0,01 Sek.         |                     |                     |                       |

Die Elementfunktion

```
size_type find_first_of(const basic_string& str, size_type pos = 0) const noexcept;
```

sucht nach dem ersten Vorkommen eines der Zeichen, das im String *str* enthalten ist. Falls ein solches Zeichen gefunden wird, ist der Funktionswert dessen Index. Wird kein solches Zeichen im String gefunden, ist der Rückgabewert *string::npos*. Entsprechend erhält man mit *find\_first\_not\_of* den Index des ersten Zeichens, das nicht im String *str* enthalten ist:

```
size_type find_first_not_of(const string& str, size_type pos = 0) const noexcept;
```

Beispiel: `string s = "123a4b5";`  
           `int i1 = s.find_first_of("45");`      // i1=4  
           `int i2 = s.find_first_of("45", i1 + 1);` // i2=6  
           `int i3 = s.find_first_not_of("12");` // i3=2  
           `int i4 = s.find_last_not_of("ab");`   // i4=6

Mit diesen Funktionen kann man Zeichenfolgen finden, die aus einer bestimmten Gruppe von Zeichen (z.B. Ziffern) bestehen.



Beispiel: Diese Funktion gibt die erste Folge von Ziffern zurück, die in dem als Argument übergebenen String enthalten ist:

```
string first_digit_substring(string s)
{
    string result;
    string digits = "0123456789";
    int p1 = s.find_first_of(digits);
    if (p1 != string::npos)
    {
        int p2 = s.find_first_not_of(digits, p1);
        if (p2 == string::npos)
            p2 = s.length();
        result = s.substr(p1, p2 - p1);
    }
    return result;
}

string s = first_digit_substring("ab123x;%"); // s="123"
```

### Aufgaben 3.2

Schreiben Sie die Lösungsfunktionen in eine wie in Abschnitt 1.2.5 beschriebene Header-Datei (z.B. mit dem Namen „Loesungen-Kap-3.h“) und rufen Sie diese auf.

Gehen Sie bei diesen Aufgaben folgendermaßen vor: Entwerfen Sie zuerst Testfälle, bevor Sie die Funktionen für die Lösung schreiben. Testen Sie Ihre Lösung dann mit diesen und weiteren Testfällen, die für einen systematischen Test (siehe Abschnitt 2.6.5) notwendig sind.

1. Bei der Arbeit mit Strings treten immer wieder Aufgaben wie die folgenden auf:

- a) Schreiben Sie eine Funktion *AnzahlZeichen*, die einen Parameter des Datentyps *string* und einen des Datentyps *char* hat. Der ganzzahlige Rückgabewert soll angeben, wie oft das *char*-Argument im *string*-Argument enthalten ist.

Beispiel: `int n=AnzahlZeichen("Prinzessin Emelie", 'e');` // `n = 3`

- b) Eine Funktion *Contains* mit zwei Parametern des Datentyps *string* soll den booleschen Wert *true* zurückgeben, wenn das erste Argument das zweite enthält, und andernfalls *false*.

Beispiel: `bool b=Contains("Holzhackerbub Maxl", "lzh");` // `b = true`

- c) Schreiben Sie eine Funktion *Split3* mit vier *string*-Parametern und dem Rückgabebetyp *bool*. Der Rückgabewert soll *true* sein, wenn das erste Argument aus drei durch einen Punkt getrennten Teilen besteht (z.B. "1.2.17", "11.12.2017" oder "www.rkaiser.de"), und andernfalls *false*. Die drei Teilstrings sollen als Referenzparameter zurückgegeben werden.

Beispiel: `std::string d, m, j;`  
`bool b = Split3("11.12.2017", d, m, j); // b = true,`  
`d="11", m="12", j="2017"`

- d) Schreiben Sie die Funktionen *TrimLeft* und *TrimRight*, die zu einem als Parameter übergebenen String einen String zurückgeben, der am Anfang bzw. Ende keine Leerzeichen enthält.

Beispiel: `string s = TrimLeft(" abc "); // s = "abc "`

- e) Eine Funktion *ReplaceAll* mit drei *string*-Parametern soll im ersten Argument jedes Vorkommen des zweiten Arguments durch das dritte ersetzen. Der *int*-Rückgabewert soll die Anzahl der Ersetzungen sein, die durchgeführt wurden.

Beispiel: `std::string s = "Jonnyathanny";`  
`int n = ReplaceAll(s, "nny", "n"); // n = 2, s = "Jonathan"`

2. Schreiben Sie eine Funktion *tokenize\_0*, die alle Teilstrings eines Strings (Datentyp *string*), die durch eines der Zeichen '.', ';', ',' und '-' getrennt sind, ausgibt. Dabei sollen die Trennzeichen nicht ausgegeben werden. Für die Strings in *test\_tokenize* sollte man die als Kommentar angegebene Ausgabe erhalten:

```
void test_tokenize()
{
    tokenize_0("456 ab.xy"); // Ausgabe "456", "ab", "xy"
    tokenize_0("123"); // nur ein token, Ausgabe "123"
    tokenize_0(""); // leerer String, keine Ausgabe
    tokenize_0(" "); // nur Separator, keine Ausgabe
}
```

Testen Sie diese Funktion, indem Sie z.B. die Strings "123" bzw. "456 ab.xy" systematisch mit einem Trennzeichen am Anfang, am Ende sowie am Anfang und am Ende kombinieren.

Anmerkung: In Aufgabe 4.2.3, 3. wird *tokenize\_0* zu einer Funktion *tokenize* überarbeitet, die die Teilstrings in einem Container zurückgibt.

3. Schreiben Sie eine Funktion *generatePassword(int n)*, die ein Wort als *string* zurückgibt, der aus *n* zufälligen Zeichen zwischen 'a' und 'z' besteht. Die Zeichen sollen mit einem Zufallszahlengenerator (siehe Abschnitt 2.4.7) ausgewählt werden.
4. Schreiben Sie eine Funktion *uintToBinaryString*, die aus einem nicht negativen ganzzahligen Wert einen String mit den binären Ziffern der Zahl erzeugt.

Sie können dazu folgendermaßen vorgehen: „Kleben“ Sie an einen zunächst leeren String die Zeichen „0“ oder „1“, und zwar je nachdem, ob die Zahl gerade oder ungerade ist. Verschieben Sie dann die Bits der Zahl um eine Position nach rechts, z.B. durch eine Division durch 2. Wiederholen Sie diese Schritte für alle Bits der Zahl.

5. Schreiben Sie eine Funktion *BigIntAdd*, die zwei positive ganze Zahlen addiert, deren Ziffern in einem String dargestellt werden. Die Länge soll lediglich durch die maximale Länge der Strings begrenzt sein.

Beispiel: `BigIntAdd("123", "1000000") = "1000123"`

Testen Sie diese Funktion, indem Sie den Wert des Strings "2" immer wieder verdoppeln. Dabei müssen sich dann die folgenden Werte ergeben:

```
22=4
23=8
24=16
...
250=1125899906842624
2100=1267650600228229401496703205376
```

### 3.3 Raw-String-Literale (Rohzeichenfolgen)

Bei einem gewöhnlichen Stringliteral wie

```
string filename = "c:\\temp\\test.dat";
```

hat das Backslash-Zeichen „\“ eine Sonderbedeutung: Es stellt nicht das Zeichen '\' dar, sondern nur zusammen mit einem oder mehreren weiteren Zeichen ein spezielles Zeichen, wie z.B. 'n' das Newline-Zeichen. Eine solche Folge von Zeichen, die mit einem Backslash beginnt, wird als Escape-Sequenz (siehe Abschnitt 2.3.7) bezeichnet.

Wenn ein String einen Backslash enthalten soll, muss man die Escape-Sequenz '\\' verwenden. Das kann bei Dateinamen und insbesondere bei regulären Ausdrücken recht kryptisch werden, da reguläre Ausdrücke oft viele Backslash-Zeichen enthalten:

```
string regexp="('(?:[^\\"']|\\\\.)*'|\"(?:[^\\""]|\\\\.)*\\\")|\"";
```

Die meisten Strings benötigen allerdings keine Escape-Sequenzen. Dem wurde in C++11 durch sogenannte „raw string“ Literale (in der Microsoft-Dokumentation „Rohzeichenfolge“) Rechnung getragen. Ein **Raw-String-Literal** kann keine Escape-Sequenzen enthalten. Deswegen kann das Backslash-Zeichen durch '\\' dargestellt werden.

Ein Raw-String-Literal beginnt im einfachsten Fall mit R"( und endet mit )". Dazwischen werden die Zeichen des Strings angegeben, die keine Escape-Sequenzen enthalten dürfen. Die Strings

```
string filename = R"(c:\temp\test.dat)";
string regexp = R"(('(?:[^\\"']|\\\\.)*'|\"(?:[^\\""]|\\\\.)*\\\")|\"";
```

stellen dieselben Zeichenfolgen wie oben dar. Die Syntax für Raw-String-Literale ist allerdings nicht besonders intuitiv. Freundlicherweise hilft Visual Studio dabei ein wenig.

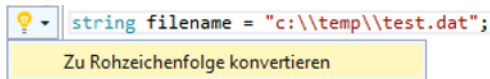
Beispiel: Nach dem Eintippen von

```
R"("
```

fügt Intellisense die zugehörigen abschließenden Zeichen ein:

```
R"()"
```

Nach dem Anklicken eines String-Literals mit der rechten Maustaste wird unter „Schnellaktionen ...“ angeboten, den String in ein Raw-String-Literal zu konvertieren:



Auf diese Weise erhält man

```
string filename = R"(c:\temp\test.dat)";
```

Der Nutzen dieser Unterstützung ist allerdings begrenzt: Der String muss korrekte Escape-Sequenzen enthalten. Andernfalls erhält man eine Fehlermeldung:

```
"c:\1emp\2est.dat"; // \1 ist keine korrekte Escape-Sequenz
```

Die etwas komplizierte Syntax von Raw-String-Literalen ergibt sich daraus, dass sie beliebige Zeichenfolgen enthalten können.

- Raw-String-Literale können das New-Line-Zeichen `\n` enthalten und deshalb über mehrere Zeilen gehen.

Beispiel: Der String

```
string mehrzeilig = R"(Zeile 1
  Zeile 2)"; // mehrzeilig = "Zeile 1\n Zeile 2"
```

enthält dieselben Zeichen wie

```
string einzeilig = "Zeile 1\n Zeile 2";
```

Dass die einzelnen Zeilen in der mehrzeiligen Version explizit erkennbar sind, macht insbesondere HTML- oder XML-Texte leichter lesbar:

```
string HTML = R"(
  <HTML>
    <HEAD>
      <TITLE>
        Mein Titel
      </TITLE>
    </HEAD>
```

```

        <BODY>
        Mein Body
    </BODY>
</HTML>");

```

- Raw-String-Literale können auch Anführungszeichen enthalten:

```
R"(mit " Anführungszeichen)"; // "mit \" Anführungszeichen"
```

- Raw-String-Literale können auch die Zeichenfolge `)` enthalten. Dann muss man aber den Begrenzer `R` durch `R"Bezeichner` ersetzen und das Literal durch `)Bezeichner` beenden. Dabei steht *Bezeichner* für einen beliebigen Bezeichner. Bei allen bisherigen Beispielen war *Bezeichner* eine leere Zeichenfolge.

Beispiel: Das Raw string Literal

```
R"(mit AZ und Klammer )")" // Fehler
```

ist nicht zulässig. Aber stattdessen geht

```
R"xy(mit AZ und Klammer)")xy" //"mit AZ und Klammer)\ " "
```

### 3.4 Stringkonversionen

Zur Konversion von Werten eines elementaren Datentyps wie *int*, *double* in Strings und umgekehrt standen in C++97 im Wesentlichen nur die Funktionen von C (*atoi*, *sprintf* usw.) zur Verfügung, sowie für Werte eines Klassentyps die *stringstream*-Klassen (siehe Abschnitt 3.4.2).

Diese Funktionen wurden in C++ 11 um Funktionen wie *to\_string*, *stoi* usw. erweitert. Auch wenn sie einige Nachteile gegenüber den C++17-Funktionen haben, sind sie oft angemessen, da sie recht einfach und intuitiv verwendet werden können.

Die vor C++17 verfügbaren Konversionsfunktionen haben einige Schwächen, wegen denen sie für manche Anwendungen ungeeignet sind. Die in allen Funktionen berücksichtigten Ländereinstellungen benötigen Zeit, obwohl sie bei Ganzzahlen keine Rolle spielen. Und die Verwendung von dynamischem Speicher oder von Exceptions ist in manchen Embedded Programmen nicht zulässig.

In C++17 wurden die Konversionsfunktionen dann durch *to\_chars* und *from\_chars* (siehe Abschnitt 3.4.2) ergänzt, die zahlreiche Schwächen und Inkonsistenzen der älteren Funktionen beheben. Sie sind schneller als die älteren Funktionen (auch schneller als die von C), aber ziemlich low level und deshalb nicht ganz so intuitiv verwendbar wie die C++11 Funktionen.

| Gruppe von Funktionen                                            | Schwächen                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| C: <i>sprintf</i> , <i>scanf</i> usw.                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• verwenden einen Formatstring, der interpretiert werden muss, was Zeit kostet</li> <li>• bei manchen Funktionen sind buffer overruns möglich.</li> </ul> |
| C: <i>atoi</i> , <i>atof</i> , <i>atoll</i> , <i>strtol</i> usw. | <ul style="list-style-type: none"> <li>• kein Hinweis auf einen Fehler</li> </ul>                                                                                                                |
| C++ 97: <i>stringstream</i> (siehe Abschnitt 3.4.2)              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• verwendet dynamischen Speicher,</li> <li>• ignoriert whitespace</li> </ul>                                                                              |
| C++ 11: <i>to_string</i> , <i>stoi</i> usw.                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• verwendet dynamischen Speicher</li> </ul>                                                                                                               |
| C++ 17: <i>to_chars</i> ,<br><i>from_chars</i>                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• nicht intuitive Syntax</li> </ul>                                                                                                                       |

### 3.4.1 C++11-Konversionsfunktionen: *to\_string*, *stoi* usw.

In C++11 wurden die folgenden globalen Funktionen für Strings aufgenommen. Sie stehen nach `#include <string>` im Namensbereich *std* zur Verfügung und konvertieren einen elementaren Datentyp in einen *string*:

```

string to_string(int val);           string to_string(unsigned val);
string to_string(long val);         string to_string(unsigned long val);
string to_string(long long val);    string to_string(unsigned long long val);
string to_string(float val);        string to_string(double val);
string to_string(long double val);

```

Von allen diesen Funktionen gibt es auch Varianten mit einem „w“ im Namen, die einen *wstring* zurückgeben.

```

wstring to_wstring(int val);        wstring to_wstring(unsigned val);
usw.

```

Beispiel: `int i=17;`  
`string s1=to_string(i); // s = "17"`

Eine Konversion von einem *string* bzw. einem *wstring* in einen elementaren Datentyp ist mit den Funktionen

```

int stoi(const string& str, size_t *idx = 0, int base = 10);
long stol(const string& str, size_t *idx = 0, int base = 10);
unsigned long stoul(const string& str, size_t *idx = 0, int base = 10);
long long stoll(const string& str, size_t *idx = 0, int base = 10);
unsigned long long stoull(const string& str, size_t *idx = 0, int base = 10);
float stof(const string& str, size_t *idx = 0);
double stod(const string& str, size_t *idx = 0);
long double stold(const string& str, size_t *idx = 0);

```

bzw. überladenen Varianten mit einem *wstring*-Parameter

*int stoi(const wstring& str, size\_t \*idx = 0, int base = 10);*  
usw.

möglich. Sie versuchen, die Zeichen ab dem ersten in den Rückgabetyt zu konvertieren. Dabei werden whitespace-Zeichen ignoriert. Falls der String mit solchen Zeichen beginnt, ist der Rückgabewert das Ergebnis der Konversion, und der Index des letzten konvertierten Zeichens wird in das Argument für *idx* geschrieben. Falls der String aber nicht mit solchen Zeichen beginnt, wird eine Exception ausgelöst.

Beispiel: Die Funktion

```
bool try_parse(std::string s, int& result)
{
    try {
        size_t idx;
        result = std::stoi(s, &idx);
        return (idx == s.length()); // Alles wurde
                                    // konvertiert
    }
    catch (...) {
        return false;
    }
}
```

gibt *true* zurück, wenn das komplette *string*-Argument eine Zahl darstellt. Mit der Funktion

```
void test_convert_to_int(std::string s)
{
    int i = -99;
    std::string msg = "s='" + s + "' i=";
    if (try_parse(s, i))
        msg += std::to_string(i);
    else
        msg += std::to_string(i) + " success=false";
    cout << msg << endl;
}
```

erhält man mit den Aufrufen die als Kommentar angegebenen Ergebnisse (-99 bedeutet, dass eine Exception ausgelöst wurde):

```
test_convert_to_int("");           // s='' i=-99 success=false
test_convert_to_int(" 7");        // s=' 7' i=7
test_convert_to_int("7 ");        // s='7 ' i=7 success=false
test_convert_to_int(" 7 ");        // s=' 7 ' i=7 success=false
test_convert_to_int(" 7 8 ");     // s=' 7 8 ' i=7 success=false
test_convert_to_int("x");         // s='x' i=-99 success=false
test_convert_to_int(" x7");       // s=' x7' i=-99 success=false
test_convert_to_int("7x ");       // s='7x ' i=7 success=false
test_convert_to_int(" 7x ");     // s=' 7x ' i=7 success=false
```

Mit einem Argument für *base* sind auch Konversionen aus anderen Zahlensystemen (z.B. dem Binär- oder Hexadezimalsystem) möglich:

```
size_t idx;
int result1 = std::stoi("0111", &idx, 2); // 7
int result2 = std::stoi("0111", &idx, 3); // 13
int result3 = std::stoi("0f", &idx, 16); // 15
```

Diese Funktionen sind wesentlich besser für Konversionen geeignet als die Funktionen *sprintf* oder *sscanf*, *atoi*, *atof* usw. von C. In älteren Versionen von C++ bieten die *stringstream*-Klassen ähnliche Funktion wie die *stringstream*-Klassen. Der C++-Standard empfiehlt aber ausdrücklich, diese älteren Klassen nicht mehr zu verwenden.

### Aufgaben 3.4.1

1. Ein *string* mit einem Kalenderdatum soll aus Zahlen für den Tag, den Monat und das Jahr bestehen, die durch einen Punkt getrennt sind (z.B. *s*="1.2.17" oder *s*="11.12.2017").
  - a) Schreiben Sie eine Funktion *stringToDate*, die die drei Zahlen für den Tag, den Monat und das Jahr in *int*-Werte konvertiert und als Referenzparameter zurückgibt. Falls alle diese Konversionen möglich sind, soll *stringToDate* den booleschen Wert *true* zurückgeben, und ansonsten *false*. Für die Teilstrings, die keine Zahl darstellen, sollen die Argumente den Wert *-1* erhalten.  
  
 Zum Zerlegen des Strings können Sie die Funktion *Split3* von Aufgabe 3.2.1c) verwenden.
  - b) Schreiben Sie systematische Testfälle (siehe Abschnitt 2.6.5) für *stringToDate*.
2. Welche Änderungen sind in der Funktion *try\_parse* notwendig, damit diese einen *string* in einen *double*-Wert konvertiert?

### 3.4.2 C++17-Konversionsfunktionen: *to\_chars* und *from\_chars*

Die Schwächen der älteren Konversionsfunktionen sind in den Funktionen *to\_chars* (zur Konversion von Zahlen in Strings) und *from\_chars* (zur Konversion von Strings in Zahlen) behoben, die in C++17 neu aufgenommen wurden. Diese Funktionen

- sind schneller als die alten Konversionsfunktionen
- lösen keine Exceptions aus und geben Fehlermeldungen über einen speziellen Rückgabetyt zurück
- prüfen, ob der konvertierte Wert im Zieldatentyp dargestellt werden kann
- verwenden keinen dynamischen Speicher
- verwenden keine Formatstrings
- verwenden beim Parsen eines Strings die Ländereinstellungen des Standard "C" locale.



Bei den folgenden Benchmarks wurden 100.000 Strings (von "00001" bis "99999") in Zahlen und 100.000 Zahlen (von 0 bis 99999) in Strings umgewandelt. Offensichtlich sind die neuen Funktionen tatsächlich schneller als die alten.

| Benchmarks Visual Studio 2019.5, Release, x64 /O2 |                           |                     |                           |                     |
|---------------------------------------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|
| 100.000 Konversionen                              | string -> int<br>Funktion | Laufzeit<br>in Sek. | int -> string<br>Funktion | Laufzeit<br>in Sek. |
| C++17                                             | <i>from_chars.</i>        | 0,0007              | <i>to_chars.</i>          | 0,001               |
| C++11                                             | <i>stoi</i>               | 0,0035              | <i>to_string</i>          | 0,002               |
| C++97                                             | <i>istringstream</i>      | 0,0420              | <i>ostingstream</i>       | 1,540               |
| C                                                 | <i>atoi</i>               | 0,0020              | <i>snprintf</i>           | 0,013               |

### Konversion von Strings in Zahlen mit *from\_chars*

Die Funktion *from\_chars* ist nach

```
#include <charconv> // oder import std.core; (siehe Abschnitt 2.13)
```

verfügbar. Von ihr gibt es Überladungen

```
std::from_chars_result from_chars(const char* const first, const
    char* const last, T& value, const int base = 10) noexcept
```

für alle Ganzzahldatentypen (T steht hier für einen der Ganzzahldatentypen), sowie Überladungen

```
std::from_chars_result from_chars(const char* const first, const
    char* const last, T& value, const std::chars_format fmt =
    std::chars_format::general) noexcept
```

für alle Gleitkommatypen. Mit

```
enum class chars_format { scientific = 0b001, fixed = 0b010,
    hex = 0b100, general = fixed | scientific };
```

kann man das Gleitkommaformat angeben. Der Rückgabetypp

```
struct from_chars_result
{
    const char * ptr;
    errc ec;
};
```

enthält mit *ptr* einen Zeiger auf das erste Zeichen, das nicht konvertiert werden konnte. Wenn alle Zeichen konvertiert werden konnten, ist der Wert von *ptr* der Wert des Arguments für *last* und *ec* der mit dem Standardkonstruktor von *errc* erzeugte Wert. Die folgenden beiden Fehler sind möglich:

- Nicht alle Zeichen konnten konvertiert werden: Dann hat *ec* den Wert *std::errc::invalid\_argument*,
- Der Wert des Strings ist zu groß für den Datentyp: Dann hat *ec* den Wert *std::errc::value\_too\_large*.

Beispiele: Ruft man die Funktion

```
void test_from_chars(std::string s)
{
    int value = -9999;

    std::from_chars_result result =
        std::from_chars(s.c_str(), s.c_str() + s.length(), value);
    int Anzahl_konvertierte_Zeichen = result.ptr - s.c_str();
    string n_str = " n_konv=" + std::to_string(
        Anzahl_konvertierte_Zeichen);
    cout << "'" << s << "' ";
    if (result.ec == std::errc())
    {
        cout << "kein Fehler, value=" << value << n_str << endl;
    }
    else if (result.ec == std::errc::invalid_argument)
    {
        cout << "invalid_argument, value=" << value << n_str << endl;
    }
    else if (result.ec == std::errc::value_too_large)
    {
        cout << "value_too_large, value=" << value << n_str << endl;
    }
    else
    {
        cout << "value=" << value << n_str << endl;
    }
}
```

mit den folgenden Argumenten

```
test_from_chars("12345");
test_from_chars("");
test_from_chars(" 12345");
test_from_chars("12345 ");
test_from_chars("12x345");
test_from_chars("12345678901234567");
```

auf, erhält man diese Meldungen

```
'12345' kein Fehler, value=12345 n_konv=5
'' invalid_argument, value=-9999 n_konv=0
' 12345' invalid_argument, value=-9999 n_konv=0
'12345 ' kein Fehler, value=12345 n_konv=5
```



Daraus kann man einen String konstruieren, indem man die Adresse des ersten und letzten Zeichens an einen String-Konstruktor übergibt:

```
string str(b.data(), tc_result.ptr - b.data()); // result="17"
```

Den etwas umständlichen Aufruf von `to_chars` kann man mit einer Funktion wie `to_string` etwas vereinfachen:

```
string to_string(int i)
{ // das geht auch mit anderen Ganzzahldatentypen als int
  string b(20, 'x'); // Puffer für konvertierte Zeichen, 20
                      // reicht auch für long long
  auto tc_result = std::to_chars(b.data(), b.data() +
                                b.size(), i); // b = "17xxxxxxxxxxxxxxxxxx"
  if (tc_result.ec == std::errc())
    return string(b.data(), tc_result.ptr - b.data()); //
                      result = "17"
  else
    return string("Puffer zu klein");
}
```

### 3.4.3 Konversionen mit Stringstreams Θ

Mit den Stringstream-Klassen *istringstream* bzw. *ostringstream* der Standardbibliothek kann man Werte von Variablen aus einem *string* lesen bzw. in einen *string* schreiben. Dabei werden die Zeichen des Strings wie die Zeichen eines Streams (siehe Abschnitt 12.4) behandelt. Dazu muss für die Datentypen der Variablen der Operator `<<` bzw. `>>` definiert sein. Diese Operatoren sind für die elementaren Datentypen vordefiniert. In Abschnitt 7.3.2 wird gezeigt, wie man diese für eine Klasse definieren kann.

Diese beiden Klassen stehen nach

```
#include <sstream> // oder import std.core; (siehe Abschnitt 2.13)
```

im Namensbereich *std* zur Verfügung. Wenn man einen *istringstream* mit einem String initialisiert

```
std::string s = "1.23";
std::istringstream is(s);
```

kann man den Wert einer Variablen mit dem Eingabeoperator `>>` aus dem Stringstream *is* einlesen:

```
double d;
is >> d; // d=1.23
```

Dabei erhält die Variable den Wert, den man auch bei einer Eingabe der Zeichen des Strings über die Tastatur erhalten würde:

```
cin >> d;
```

Zur Vereinfachung werden in den folgenden Beispielen vor allem elementare Datentypen wie *int* und *double* verwendet. Diese Beispiele lassen sich aber leicht auf andere Datentypen übertragen, für die die Operatoren `>>` bzw. `<<` definiert sind.

Für eine *stringstream*-Variable *is* ist wie für alle Stream-Variablen der Negations-Operator definiert. Der Wert `!is` gibt dann an, ob der Anfang des Strings konvertiert werden konnte. Mit

```
bool try_parse_1(std::string s, int& result)
{
    std::istringstream is(s);
    is >> result;
    return !(!is);
}
```

wird für alle *string*-Argumente, die mit einer Zahl beginnen, diese in das zweite Argument konvertiert. Die Prüfung, ob alle Zeichen konvertiert werden konnten, ist aber etwas schwieriger:

```
bool try_parse_2(std::string s, int& result)
{
    std::istringstream is(s);
    is >> result;
    if (!is)
        return false;
    else
    {
        bool success = true;
        std::istringstream::pos_type p = is.tellg();
        size_t p3 = size_t(p);
        if (p3 != size_t(-1))
            success = p3 == s.length();
        return success;
    }
}
```

Mit dieser Funktion erhält man dasselbe Ergebnis wie mit der Funktion *try\_parse* aus dem letzten Abschnitt. Sie beruht im Wesentlichen auf der Funktion

```
streampos tellg(); // streampos kann in size_t konvertiert werden
```

die Anzahl der konvertierten Zeichen zurückgibt. Ist dieser Wert gleich der Länge des Strings, konnten alle Zeichen konvertiert werden. Der Rückgabewert `-1` bedeutet, dass *d* kein Wert zugewiesen wurde.

Mit einem *ostringstream* kann man Werte **in einen String** schreiben. Dazu gibt man die Werte mit dem Ausgabeoperator in einen *ostringstream* aus:

```
std::ostringstream os;
os << d;
```

Der so erzeugte String ist der Rückgabewert der Elementfunktion `str()`:

```
os.str()
```

Er besteht aus den Zeichen, die am Bildschirm ausgegeben würden, wenn man die Werte mit dem Ausgabeoperator in `cout` schreiben würde:

```
cout << d;
```

Da Stringstreams intern wie Streams verwaltet werden, ist es am einfachsten, für jede Konversion eine neue Stringstream-Variable anzulegen.

### 3.5 `string_view` –Strings zum Anschauen

Oft werden Zeichenfolgen in einer Funktion nur verwendet, aber nicht verändert. Dann übergibt man diese meist als Parameter des Typs `const std::string&`. Wenn man diese Funktion dann aber mit einem Argument des Typs `char*` oder `const char*` aufruft, erzeugt der Compiler aus dem Argument einen `std::string`, was mit einem gewissen Zeitaufwand verbunden ist. Bei der Rückgabe eines `char*` an einen Funktionswert des Typs `std::string` tritt derselbe Aufwand auf.

Diese oft relativ aufwendigen Kopien kann man mit einem nach

```
#include <string_view> // oder import std.core; (siehe Abschnitt 2.13)
```

im Namensbereich `std` verfügbaren `string_view` vermeiden. Ein `string_view` ist ein Verweis auf eine Zeichenfolge, der typischerweise einen Zeiger auf ein erstes Zeichen und eine Anzahl von Zeichen enthält:

```
class string_view
{
    char* p; // Zeiger auf das erste Zeichen
    int n;   // Anzahl der Zeichen
public:
    // alle konstanten Elementfunktionen von std::string
};
```

Das „view“ im Namen `string_view` soll zum Ausdruck bringen, dass die Zeichenfolge nur betrachtet werden, aber nicht verändert werden soll.

Da ein `string_view` eine Folge von `n` Zeichen ab einer Anfangsadresse darstellt, ist `string_view` ein **gemeinsamer Nenner** für alle Strings auf dieser Basis, auch wenn sie verschiedene Datentypen haben. Dazu gehören nicht nur nullterminierte Strings und `std::string`, sondern auch proprietäre Stringklassen wie `CString` (MFC) oder `QString` (Qt). Vor der Einführung von `string_view` war `char*` dieser gemeinsame Nenner.

Die Klasse *string\_view* hat neben einem Standardkonstruktor und einem Kopierkonstruktor nur zwei Konstruktoren. Mit diesen kann man ein Objekt aus einem nullterminierten String und *std::string* erzeugen kann:

```
constexpr string_view(const char* p) noexcept; // nicht explicit
// konstruiert einen string_view aus einem nullterminierten
// String und einem std::string (da nicht explicit)

constexpr string_view(const char* p, const size_type n) noexcept
// schneller als die erste Variante, da die
// Länge nicht berechnet werden muss
```

Ein vordefinierter Konversionsoperator der Klasse *string* konvertiert einen *string* in einen *string\_view*.

Ein *string\_view* wird normalerweise als Wertparameter übergeben, und nicht als Referenz.

Will man eine Funktion sowohl mit Argumenten des Typs *string* als auch *const char\** aufrufen, ist das mit einem *string\_view* Parameter direkt möglich. Mit einem *const char\**-Parameter muss man mit einem *string*-Argument die Elementfunktion *c\_str()* aufrufen.

Beispiel: Mit einem *string\_view*-Parameter

```
void sv_parameter(std::string_view sv) {}
```

sind diese beiden Aufrufe

```
std::string s;
const char* p = "";
sv_parameter(s);
sv_parameter(p);
```

zulässig. Mit einem *string*-Parameter wäre dagegen nur der erste Aufruf zulässig. Mit MFC- oder Qt-Strings sind die folgenden Aufrufe möglich:

```
CString cstr = "..."; // MFC-String
sv_parameter(cstr.GetString());

QString qstr = "..."; // Qt-String
sv_parameter(qstr.toLatin1().constData());
```

Ein *string\_view* unterscheidet sich von einem *string* vor allem dadurch,

- dass beim Anlegen einer *string\_view*-Variablen **kein dynamischer Speicher** mit *new* reserviert wird
- dass Kopien von *string\_views* (z.B. als Wertparameter) schneller sind, da nur ein Zeiger und ein *int*-Wert kopiert werden müssen und kein dynamischer Speicher reserviert werden muss.
- dass Funktionen wie *substr(n1,n2)* nur (p+n1,n2-n1) zurückgeben müssen (wenn p der Zeiger auf das erste Element und n die Anzahl der Zeichen ist), ohne den substring zu kopieren.

Ein *string\_view* enthält alle konstanten Elementfunktionen von *string*. Deswegen können viele Operationen mit einem *string\_view* genauso wie mit einem *string* durchgeführt werden. Die Elementfunktionen eines *string\_view* sind **manchmal schneller** als die eines *string*.

Beispiel: Für einen Laufzeitvergleich von *string* und *string\_view* wurden einmal (in der Zeile mit *remove\_first* der Tabelle unten) Anweisungen gewählt, bei denen der Geschwindigkeitsvorteil von *string\_view* bei großen Strings beträchtlich ist. Dazu wurden die Funktionen

```
std::string remove_first_s(const string& s)
{
    if (s.length() > 3)
        return s.substr(3);
    else
        return "";
}

std::string_view remove_first_sv(std::string_view s)
{
    // genau dieselben Anweisungen wie in remove_first_s
}
```

mit einem 100.000 Zeichen langen *string*-Argument aufgerufen.

Bei vielen Anwendungen aus der Praxis ist der Vorteil aber gering. Das gilt z.B. für einen wiederholten Aufruf der Funktion *first\_digit\_substring* (siehe Abschnitt 3.2), mit der in einem String aus Zahlen und Buchstaben allen Zahlen gesucht werden.

| Benchmarks Visual Studio 2019.4, Release, x64 /O2   |            |               |
|-----------------------------------------------------|------------|---------------|
| String Länge 100'000                                | string&    | string_view&  |
| <i>remove_first</i>                                 | 0,045 Sek. | 0,000001 Sek. |
| mit <i>first_digit_substring</i> alle Zahlen suchen | 0,001 Sek. | 0,0009 Sek.   |

Diese Vorteile sind aber mit dem **Nachteil** verbunden, dass ein *string\_view* nicht der Eigentümer der Zeichenfolge ist, d.h. den Speicherbereich nicht verwaltet. Wird die Zeichenfolge verändert, kann der *string\_view* ungültig werden. Deshalb darf ein *string\_view* auch nicht mit einem temporären Objekt initialisiert werden, und ein **Container** sollte **nicht** den **Elementtyp** *string\_view* haben.

Beispiel: Die folgenden Anweisungen führen zu einem Programmabbruch, da der **lokale String** nach dem Verlassen des Blocks nicht mehr existiert, aber die *string\_view*-Variable auf diesen verweist:

```
std::string_view result;
{
    string lokalerString = LangerString_2(100'000);
    result = remove_first_sv(lokalerString);
}
cout << result.substr(100'000) << endl;
```



Bei den nächsten beiden Anweisungen ist die erste unproblematisch, da das erste Argument ein statisch angelegter String ist. Das zweite Argument ist dagegen ein **temporäres Objekt**:

```
using namespace std;
std::string_view result1 = remove_first_sv("gugugugugugu");
std::string_view result2 = remove_first_sv("gugugugugugu"s);
```

Diese Gefahr besteht auch bei einem **Container mit *string\_views***, wenn man Elemente ablegt, die später nicht mehr existieren:

```
std::vector<std::string_view> v;

void fill_v()
{
    std::string s;
    v.push_back(s); // beim Verlassen der Funktion wird s frei-
                    // gegeben
```

Bei der Arbeit mit *string\_view* ist also Vorsicht geboten, da ein *string\_view* wie ein Zeiger auf Speicherbereiche verweisen kann, die nicht mehr existieren. Deshalb verwendet man *string\_view* **vor allem für Parameter** einer Funktion, **aber nicht** als Rückgabety, Datentyp eines Datenelements einer Klasse oder einer Variablen.

String\_views existieren auch für weitere Zeichentypen:

```
using string_view = basic_string_view<char>;
using u16string_view = basic_string_view<char16_t>;
using u32string_view = basic_string_view<char32_t>;
using wstring_view = basic_string_view<wchar_t>;
```

Literale des Typs *string\_view* erhält man nach

```
using namespace std::literals;
```

mit dem Suffix *sv*.

Beispiel: Die als Kommentar angegebene Ausgabe zeigt, dass ein *string\_view* im Unterschied zu einem *string* durch die Länge und nicht durch einen Nullterminator `\0` begrenzt wird:

```
using namespace std::literals;
std::string_view s1 = "abc\0\0def";
std::string_view s2 = "abc\0\0def"sv;
cout << s1.size() << " '" << s1 << "'\n"; // 3 'abc'
cout << s2.size() << " '" << s2 << "'\n"; // 8 'abc^@^@def'
```

## 3.6 Unicode-Strings Θ

Nullterminierte Strings mit 16- und 32-Bit **Unicode**-Zeichen werden mit den Datentypen *char16\_t* und *char32\_t* dargestellt. Literale dieser Typen werden mit einem *u* oder *U* am Anfang gekennzeichnet:

```
const char16_t* s2 = u"UTF-16 Unicode string"; // kleines u
const char32_t* s3 = U"UTF-32 Unicode string"; // großes U
```

Die Stringklassen *u16string* und *u32string* stellen Strings mit 16- und 32-Bit Unicode-Zeichen dar. Literale dieser Stringklassen erhält man mit einem *s* am Ende:

```
using namespace std;
u16string s1 = u"UTF-16 Unicode string";
u16string s2 = u"UTF-16 Unicode string"s;
u32string s3 = U"UTF-32 Unicode string";
u32string s4 = U"UTF-32 Unicode string"s;
```

Unicode Strings können auch arabische, chinesische Zeichen usw. darstellen:

```
u16string a1 = u"ب ب ث ش ئ"; // arabische Zeichen
u32string a2 = U"ب ب ث ش ئ"; // arabische Zeichen
```

Auch Unicode Strings können als Raw-String-Literale dargestellt werden:

```
u16string r1 = uR"(UTF-16 Unicode string)";
u16string r2 = uR"(UTF-16 Unicode string)"s;
u32string r3 = UR"(UTF-32 Unicode string)";
u32string r4 = UR"(UTF-32 Unicode string)"s;
```

Die Elementfunktionen *length* und *size* geben bei Unicode Strings die Anzahl der Zeichen des Strings zurück, und nicht die Anzahl der belegten Bytes.

Beispiel: Die Aufrufe von

```
string ShowBytes(char* c, int n)
{
    string e;
    for (int i = 0; i < n; i++)
        e = e + std::to_string(c[i]) + " ";
    return e;
}
```

mit

```
char32_t U[4] = { U'a', U'b', U'ä', U'ß' };
char16_t u[4] = { u'a', u'b', u'ä', u'ß' };
```

zeigen die Byte-Folgen, mit denen ein Unicode-String intern dargestellt wird:

```
string ue = ShowBytes((char*)u, 8); // ue = "97 0 98 0 -28
                                     0 -33 0 "
string Ue = ShowBytes((char*)U, 16); // Ue = "97 0 0 0 98 0 0
                                     0 -28 0 0 0 -33 0 0 0 "
```

Für Unicode Strings sind keine Ausgabestreams wie *cout* und *wcout* definiert.

Beispiel: Will man einen *u16string* oder einen *u32string* mit *cout* ausgeben, erhält man Fehlermeldung wie die als Kommentar angegebene:

```
u16string s1 = u"UTF-16 String";
u32string s2 = U"UTF-32 String";
cout << s << endl; // Kein <<-Operator passt zu u16string
```

Bei der Ausgabe von *c\_str()* erhält man einen Zahlensalat, dem man die Zeichen des Strings nicht ansieht:

```
cout << s1.c_str() << s2.c_str() << endl;
// 0000025977199AB00000025977197370
```

### 3.7 Landespezifische Einstellungen Θ

Mit Funktionen wie

```
std::string Uppercase(std::string s)
{
    for (auto& i : s)
        i = std::toupper(i); // #include <cctype>
    return s;
}

std::wstring Uppercase(std::wstring s)
{
    for (auto& i : s)
        i = std::towupper(i); // #include <cwctype>
    return s;
}
```

kann man Strings der Typen *string* und *wstring* in Großbuchstaben umwandeln. Dabei werden allerdings keine landesspezifischen Besonderheiten berücksichtigt. So werden z.B. bei den Strings

```
std::string s0= "Füschärs Frütz früßt 123 frösche Frösche";
std::wstring w0 = L"Füschärs Frütz früßt 123 frösche Frösche";
```

die Umlaute nicht in Großbuchstaben umgewandelt (für *u16string* und *u32string* erhält man dieselben Ergebnisse):

```
std::string s1 = Uppercase(s0); // s1 = "FÜSCHÄRS FRÜTZ FRÜBT 123
                                FRÜSCHE FRÖSCHE"
std::wstring w1 = Uppercase(w0); // w1 = L"FÜSCHÄRS FRÜTZ FRÜBT 123
                                FRÜSCHE FRÖSCHE"
```

Wenn man diese berücksichtigen will, muss man Funktionen wie

```
std::string Uppercase(std::string loc, std::string s)
{ // Argumente für loc: Siehe https://docs.microsoft.com/en-us/cpp/c-runtime-library/country-region-strings
  std::locale::global(std::locale(loc));
  const std::ctype<char>& f =
      std::use_facet<std::ctype<char>>>(std::locale());
  f.toupper(&s[0], &s[0] + s.size());
  return s;
}

std::wstring Uppercase(std::string loc, std::wstring s)
{
  std::locale::global(std::locale(loc));
  auto& f = std::use_facet<std::ctype<wchar_t>>>(std::locale());
  f.toupper(&s[0], &s[0] + s.size());
  return s;
}
```

verwenden. Diesen übergibt man für *loc* einen String, der die Landeseinstellung global definiert. Diese Strings sind nicht im Standard definiert, sondern compilerspezifisch. Zulässige Argumente für Microsoft Visual C++ sind z.B.

- "": Mit diesem Argument werden die Landeseinstellungen des Betriebssystems verwendet.
- "German\_germany" oder "de-de" (beide gleichwertig)
- "english-us" oder "en-US" (beide gleichwertig)
- "C": Die Voreinstellung (die Einstellungen der Programmiersprache C), die keine landesspezifischen Einstellungen verwendet.

Die lokale Variable *f* des Typs *ctype<T>* verwendet dann diese Landeseinstellungen. Sie hat zahlreiche Elementfunktionen, mit denen man z.B. die Kategorie eines Zeichens (Ziffer, Buchstabe usw.) feststellen kann.

Mit diesen Funktionen erhält man dann die als Kommentar angegeben Strings:

```
std::string s2 = Uppercase("", s0); // s2 = L"FÜSCHÄRS FRÜTZ FRÜBT
                                123 FRÜSCHE FRÖSCHE"
std::wstring w2 = Uppercase("", w0); // w2 = L"FÜSCHÄRS FRÜTZ FRÜBT
                                123 FRÜSCHE FRÖSCHE"
```

Die Werte der Voreinstellung erhält man mit

```
std::string sc = Uppercase("C", s0); // sc = "FÜSCHÄRS FRÜTZ FRÜBT
                                     123 FRÜSCHE FRÖSCHE"
std::wstring wc = Uppercase("C", w0); // wc = L"FÜSCHÄRS FRÜTZ FRÜBT
                                     123 FRÜSCHE FRÖSCHE"
```

Landesspezifische Einstellungen kann man dann iostreams, FileStreams usw. mit Anweisungen wie

```
std::cout.imbue(std::locale(""));
```

zuordnen. Vor der Ausführung dieser Anweisung erhält man mit

```
cout << s1 << endl;
```

auf der Konsole die Ausgabe

```
F³SCHÖRS FR³TZ FR³■T 123 FR³SCHE FR÷SCHE
```

und danach

```
FÜSCHÄRS FRÜTZ FRÜBT 123 FRÜSCHE FRÖSCHE
```

Diese Einstellungen wirken sich auch auf das Ausgabeformat von anderen Datentypen (z.B. Gleitkommatentypen) aus. Mit

```
std::cout.imbue(std::locale(""));
cout << 3.14 << endl;
```

erhält man auf einem Rechner mit einem deutschen Windows die Ausgabe mit einem Dezimalkomma

```
3,14
```

und mit

```
std::cout.imbue(std::locale("en-US"));
cout << 3.14 << endl;
```

die Ausgabe mit einem Dezimalpunkt:

```
3.14
```

### 3.8 Reguläre Ausdrücke

Mit regulären Ausdrücken kann man komplexe Muster in Strings suchen. Reguläre Ausdrücke können in Visual Studio unter der Menüoption *Bearbeiten|Suchen* verwendet werden. In einem Programm stehen sie nach

```
#include <regex> // oder import std.regex; (siehe Abschnitt 2.13)
```

über die Klasse **regex** aus dem Namensbereich *std* zur Verfügung. *regex* ist eine Spezialisierung von *basic\_regex* für *char*-Elemente. Eine weitere Spezialisierung **wregex** für *wchar\_t*-Elemente kann genauso verwendet werden:

```
using regex = basic_regex<char>; // wie typedef basic_regex<char>
                                   regex;
using wregex = basic_regex<wchar_t>;
```

Im Fall eines Fehlers lösen die *regex*-Funktionen eine Exception aus. Deshalb sollten diese in einer *try*-Anweisung aufgerufen werden.

Im Folgenden werden reguläre Ausdrücke zunächst nur für die Suche nach Textmustern mit den Funktionen (genau genommen: Funktions-Templates)

```
bool regex_match(const string& str, const regex& re,
                 match_flag_type flags = match_default);
bool regex_search(const string& str, const regex& re,
                  match_flag_type flags = match_default);
```

verwendet. **regex\_search** gibt genau dann *true* zurück, wenn ein Teilstring des übergebenen Strings zum regulären Ausdruck passt. Bei **regex\_match** muss dagegen der gesamte String zum regulären Ausdruck passen. Für *flags* kann man einen der zahlreichen Werte des streng typisierten Aufzählungstyps *regex\_constants* angeben. In der Praxis sind die meisten aber nicht wichtig. Hier nur ein kleiner Auszug:

| Flag                                        |                                             |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
| <code>regex_constants::icase</code>         | Unabhängig von Groß- und Kleinschreibung    |
| <code>regex_constants::match_not_bol</code> | match am Zeilenanfang nicht berücksichtigen |
| <code>regex_constants::ECMAScript</code>    | ECMA Dialekt                                |
| <code>regex_constants::grep</code>          | grep Dialekt                                |

Auf die weiteren Funktionen und Klassen, die verschiedenen Dialekte (ECMA und perl Scripts) und die Möglichkeit, Textmuster zu ersetzen, wird nicht eingegangen. Viele Beispiele sind so gewählt, dass sie auch für die Suche im Editor mit *Bearbeiten*|*Suchen und Ersetzen* verwendet werden können.

Diesen Funktionen übergibt man als zweites Argument einen regulären Ausdruck. Ein regulärer Ausdruck wird durch eine Variable des Typs **regex** dargestellt und mit einem String definiert, der bei der Definition der Variablen angegeben wird:

```
regex(const string& str, flag_type flags = ECMAScript);
```

Ein solcher String besteht aus

- gewöhnlichen Zeichen** (alle Zeichen außer  $\$ ^ \{ [ ( | ) * + ? \backslash$ ), und sogenannten
- Metazeichen** (Zeichenfolgen, die mit  $\$ ^ \{ [ ( | ) * + ? \backslash$  beginnen)

Falls der String keinen regulären Ausdruck darstellt, wird eine Exception ausgelöst.

Der Funktionswert von *regex\_match* und *regex\_search* gibt dann an, ob das erste Argument zu dem regulären Ausdruck passt (Rückgabewert *true*). Wenn man ein Zeichen verwenden will, das auch einem Metazeichen entspricht, muss man vor dem Zeichen ein *\* angeben.

Beispiel: Die Funktion

```
void test_regex(string p, std::vector<std::string> a)
{
    cout << "regulärer Ausdruck: " << p << endl;
    try {
        const std::regex pattern(p);
        for (int i = 0; i < a.size(); i++)
        {
            if (std::regex_search(a[i], pattern))
                cout << a[i] + " passt zu " << p << endl;
            else
                cout << a[i] << " passt nicht zu " << p << endl;
        }
    }
    catch (std::exception& e)
    {
        cout << "Exception: " << e.what() << endl;
    }
}
```

zeigt für jeden String im Vektor *a* an, ob er zu dem für *p* übergebenen regulären Ausdruck passt.

Mit einem regulären Ausdruck ohne Metazeichen prüft *regex\_search*, ob die Zeichenfolge des regulären Ausdrucks im Argument für *str* enthalten ist.

Beispiel: Mit den Strings

```
vector<string> s={"124", "-1234", " 123%", "abcd", "321" };
```

ergibt der Aufruf

```
test_regex("123", s);
```

die folgende Ausgabe:

```
124 passt nicht zu 123      -1234 passt zu 123
123% passt zu 123          abcd passt nicht zu 123
321 passt nicht zu '123'
```

Die nächsten Tabellen enthalten einige Metazeichen. Das Zeichen „\“ muss in einem gewöhnlichen C++-String doppelt angegeben werden. Diese Tabellen sind aber nicht vollständig und sollen lediglich einen ersten Eindruck geben.

Eine Zeichenklasse beschreibt eine Gruppe von Zeichen, die im String enthalten sein müssen, damit der String zum regulären Ausdruck passt.

| Zeichenklassen                    | Bedeutung: Ein String passt zur Zeichenklasse, wenn der String diese Zeichen enthält:                                                          |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [character_group]                 | ein beliebiges Zeichen der angegebenen Zeichengruppe                                                                                           |
| [^ character_group ]              | ein beliebiges Zeichen, das nicht in der angegebenen Zeichengruppe enthalten ist.                                                              |
| [firstCharacter – lastCharacter ] | ein beliebiges Zeichen im Bereich. Falls eine Zeichengruppe ein Minuszeichen enthalten soll, muss es als Escapesequenz „\\-“ angegeben werden. |
| \\w                               | ein beliebiges Wortzeichen, in allen Dialekten wie [A-Za-z]. In manchen passen auch    und [0-9]                                               |
| \\W                               | wie [^\\w]                                                                                                                                     |
| .                                 | (Punkt) ein beliebiges Zeichen.                                                                                                                |
| \\s                               | ein beliebiges Whitespace-Zeichen                                                                                                              |
| \\S                               | ein beliebiges Nicht-Leerzeichen, wie [^\\s]                                                                                                   |
| \\d                               | eine Dezimalziffer                                                                                                                             |
| \\D                               | ein Zeichen, das keine Dezimalziffer ist, wie [^\\d]                                                                                           |

Zeichenklassen und andere Sprachelemente von regulären Ausdrücken können beliebig kombiniert werden.

Beispiel: Eine Zeichengruppe mit einem Zeichen entspricht dem Zeichen. Die beiden regulären Ausdrücke "x" und "[x]" sind gleichwertig (der Buchstabe 'x'), ebenso "\\\*" und "[\\\*]" (das Zeichen '\*' und nicht der später vorgestellte Operator \*).

Zu dem regulären Ausdruck

```
string containsInt_100_999_rx = "[1-9][0-9][0-9]";
```

passt eine Zeichenfolge, die mit einer Ziffer im Bereich 1..9 beginnt und von zwei Ziffern im Bereich 0..9 gefolgt wird (Zahlen im Bereich von 100 bis 999). Von den Strings

```
vector<string> s = { "a124b", "-1234", "321", " 12%",  
                    "a024b", "a12 3d" };
```

passen die ersten drei, und die letzten drei passen nicht. Mit den regulären Ausdrücken

```
"[123456789][0-9][0-9]"  
"[1-9]\\d\\d"
```

erhält man dasselbe Ergebnis. Zu dem regulären Ausdruck

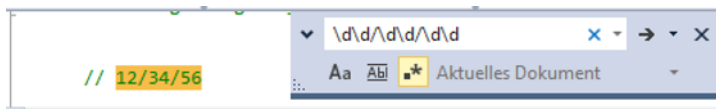
```
string containsDate_rx = "\\d\\d/\\d\\d/\\d\\d";
```

passt eine Datumsangabe im amerikanischen Format MM/DD/YY, bei dem drei Paare von Ziffern durch ein ,/'-Zeichen getrennt werden. Dieser letzte Ausdruck ist als Raw-String-Literal einfacher und übersichtlicher:



```
string containsDate_rx = R"(\d\d/\d\d/\d\d)";
```

Bei *Bearbeiten*|*Suchen* kann man die Raw-String-Literal Syntax verwenden:



**Positionsangaben** legen eine Position fest, an der eine Zeichenfolge auftreten muss, damit der String zum regulären Ausdruck passt.

| Positionsangabe | Position, an der die Zeichenfolge stehen muss                                                                                                                                              |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ^               | Am Anfang des Strings                                                                                                                                                                      |
| \$              | Am Ende des Strings                                                                                                                                                                        |
| \b              | An einer Wortgrenze (Übergang zwischen alphanumerischen und nicht alphanumerischen Zeichen). Wenn \b am Anfang steht, muss der Wortanfang passen, und wenn es am Ende steht, das Wortende. |

Damit der gesamte Vergleichsstring einem Muster entspricht (und nicht nur in ihm enthalten ist), verwendet man ^ am Anfang und \$ am Ende. So kann man auch prüfen, ob ein von einem Benutzer eingegebener String zu einem bestimmten Muster passt.

Beispiel: Mit dem regulären Ausdruck (siehe das Beispiel von oben)

```
string containsInt_100_999_rx = "[1-9][0-9][0-9]";
```

passt zu den regulären Ausdrücken

```
string s_beg = "^" + containsInt_100_999_rx;
string s_end = containsInt_100_999_rx + "$";
string s_tot = "^" + containsInt_100_999_rx + "$";
```

nur ein String, der mit dem Muster beginnt (*s\_beg*), mit dem Muster endet (*s\_end*) oder als Ganzes das Muster darstellt.

Die nächsten Beispiele werden mit den Strings

```
vector<string> v = { "chianti classico", "firstclass wine",
                    "    class Wine{}} "};
```

illustriert. Zu dem regulären Ausdruck

```
string containsWord1_rx = R"(class)"; // passt zu allen
```

passt ein String, der das Wort "class" enthält (das sind alle Strings in *v*). Und zu

```
string WordStartingWith_rx = R"(\bclass)"; // dazu passt 1.
                                           und 3.
```

passt ein String, der ein Wort enthält, das mit "class" beginnt. Zu

```
string WordEndingWith_rx=R"(class\b)";//dazu passt 2. und 3.
```

passt ein String, der ein Wort enthält, das mit "class" endet. Zu

```
string isolatedWord_rx = R"(\bclass\b)"; //dazu passt nur 3.
```

passt ein String, der "class" als eigenständiges Wort enthält.

Nach einem Ausdruck kann ein Quantifizierer angegeben werden, der dann für den unmittelbar davor stehenden Ausdruck gilt. Ein Quantifizierer gibt an, wie oft eine Zeichenfolge enthalten sein muss, damit der String zum regulären Ausdruck passt.

| Quantifizierer | Bedeutung                                        |
|----------------|--------------------------------------------------|
| *              | Null oder mehr Übereinstimmungen                 |
| +              | Eine oder mehr Übereinstimmungen                 |
| ?              | Null oder eine Übereinstimmung                   |
| {n}            | genau n Übereinstimmungen                        |
| {n,}           | mindestens n Übereinstimmungen                   |
| {n,m}          | mindestens n, aber höchstens m Übereinstimmungen |

Beispiele:

- 1. Ob ein String zwei bestimmte Worte enthält mit beliebigen Zeichen dazwischen, kann man mit einem regulären Ausdruck prüfen, bei dem jedes Wort an Wortgrenzen (\b) anfangen und enden muss, und dazwischen beliebig viele beliebige Zeichen kommen können (.\*). Der String

```
"Ein Tankwart hat Elvis Presley gestern gesehen. Das ist der Beweis. Er lebt!"
```

passt zu dem regulären Ausdruck

```
string ElvisLebt_rx = R"(\bElvis\b.*\blebt\b)";
```

- 2. Da das Zeichen + ein Metazeichen ist, muss man einen Backslash angeben, damit es im String berücksichtigt wird. Zu dem regulären Ausdruck

```
1\\+1=2
```

passt der String "Beweisen Sie, dass 1 + 1 = 2 ist". Er passt aber nicht zu

```
1+1=2
```

- 3. Ganze Zahlen passen zu dem regulären Ausdruck

```
string Int_rx = R"([-+]?\\d+)";
```

- 4. Versucht man, einen regulären Ausdruck zu finden, zu dem eine Zuweisung an eine Variable x passt, liegt auf den ersten Blick

```
string AssignToX_rx1 = R"(\s*x\s*=)";
```

nahe (beliebig viele Leerzeichen: `\s*`, dann `x`, dann wieder beliebig viele Leerzeichen, dann `=`). Zu diesem regulären Ausdruck passen aber nicht nur die ersten drei Strings von

```
vector<string> s = { "x=17", "  x  =17", "   x=17", " x==17",  
                  " nix==17", "  if (x == 17)", "x17;", "a=x" };
```

sondern auch der vierte `"x==17"`, fünfte `"nix==17"` und der sechste `"if(x == 17)"`. Die letzten beiden passen nicht. Damit der fünfte Ausdruck nicht passt, kann man verlangen, dass die Zeichenfolge an einer Wortgrenze beginnt und endet:

```
string AssignToX_rx2 = R"(\s*\b x\s*=)";
```

Damit der vierte und sechste Ausdruck nicht passt, kann man verlangen, dass nach einem Gleichheitszeichen ein Buchstabe oder eine Ziffer kommt:

```
string AssignToX_rx3 = R"(\s*\b x\s*=[\w\d])";
```

Aber auch dieser reguläre Ausdruck deckt noch nicht die gesamte C++-Syntax für Zuweisungen ab. Die Zuweisung eines dereferenzierten Zeigers (z.B. `x = *p`), kombinierte Zuweisungsoperatoren (z.B. `x += 1`), `x++` usw. werden noch nicht berücksichtigt, und Zuweisungen in Kommentaren werden auch erkannt.

Dieses Beispiel sollte auch zeigen, dass es ziemlich knifflig werden kann, für einen konkreten Anwendungsfall einen passenden regulären Ausdruck zu finden.

Will man nicht nur nach Zuweisungen an eine Variable mit dem Namen `x` suchen, sondern den Namen der Variablen als Parameter an eine Funktion übergeben, ist das mit der Funktion

```
string AssignTo_rx(string VarName)
{
    return R"(\s*\b)" + VarName + R"(\s*=[\w\d])";
}
```

möglich. Der von *AssignTo\_rx* zurückgegebene String ist im Wesentlichen der String aus dem letzten Beispiel:

```
string AssignToX_rx3 = R"(\s*\b x\s*=[\w\d])";
```

Der einzige Unterschied ist, dass `x` durch das Argument ersetzt wird. Mit

```
vector<string> s = { "ab=17", "  ab  =17", "   ab=17",  
                  " ab==17", " niab=17", "  if (ab == 17)",  
                  "ab17;", "a=ab", "  abab= 2", "ab=*17" };  
test_regex(tb, AssignTo_rx("ab"), s);
```

erhält man, dass die ersten drei Strings passen.

Mit einem Klammerpaar () kann man Teilausdrücke zusammenfassen. Teilausdrücke können zu einer leichteren Verständlichkeit beitragen und ermöglichen die Quantifizierung von Ausdrücken.

| Gruppenkonstrukte | Bedeutung    |
|-------------------|--------------|
| ( subexpression ) | Teilausdruck |

Mit dem Operator | kann man Ausdrücke kombinieren. Der so entstandene Gesamtausdruck passt dann, wenn einer der Teilausdrücke passt.

| Alternierungskonstrukte | Bedeutung                       |
|-------------------------|---------------------------------|
|                         | Einer der Operanden muss passen |

Beispiel: Zu dem regulären Ausdruck

```
string Class_rx = "class|struct";
```

passt ein String, der "class" oder "struct" enthält, zu

```
string Em_rx = "Em(ma|elie)";
```

passen "Emma" und "Emelie", und zu

```
string An_rx = "(\\w{6,8})an";
```

passen "Jonathan" und "Maximilian".

Eine Gleitkommazahl besteht aus einem optionalen Vorzeichen, auf das Ziffern, ein Dezimalpunkt und weitere Ziffern folgen:

```
string Float_rx = R"([-+]?([0-9]*\\.[0-9]+|[0-9]+))";
```

Mit regulären Ausdrücken wird oft auch die Syntax von **Internet-** oder **EMailadressen** und **Dateinamen** geprüft.

Beispiel: Eine EMail-Adresse besteht (etwas vereinfacht) aus den folgenden Bestandteilen:

- 1. Am Anfang eine Folge aus Buchstaben, Ziffern und den Zeichen '!', '%', '\_', '+' oder '-'.
- 2. Dem Zeichen '@'
- 3. Eine Folge aus Buchstaben, Ziffern und den Zeichen '.' oder '-'.
- 4. Ein Punkt
- 5. Am Schluss zwei bis vier Buchstaben

Mit dem regulären Ausdruck

```
"^[A-Za-z0-9%+._\\-]+" // 1.
"@" // 2.
"[A-Za-z0-9.\\-]+" // 3.
```

```
"\\. "           // 4.
"[A-Za-z]{2,4}$" // 5.
```

erhält man die folgenden Ergebnisse:

| zulässig                  | nicht zulässig               |
|---------------------------|------------------------------|
| tarzan@junglenet.com      | tarzan-1@junglenet.africa *  |
| jane@xxx-net.za           | "sweetie"jane@xxx-net.za *   |
| 2+3 jane@xxx-net.za       | jane@@abc.def                |
| jane...@123.xyz.456.78.za | jane@123.45.678?subject=Hi"* |

Hier sind die mit \* gekennzeichneten Ergebnisse falsch, d.h. die Adressen sind zulässig, weil der reguläre Ausdruck zu einfach ist.

Um alle nach dem offiziellen Standard für EMail-Adressen (RFC 2822) zulässigen Adressen zu prüfen, sind kompliziertere reguläre Ausdrücke notwendig. Auf <http://www.regular-expressions.info/email.html> wird behauptet, dass

```
A(?:[a-z0-9!#$%&'*/+=?^_`{|}~-]+(?:\. [a-z0-9!#$%&'*/+=?^_`{|}~-]+)*|"(?:[\x01-\x08\x0b\x0c\x0e-\x1f\x21\x23-\x5b\x5d-\x7f]|\[\x01-\x09\x0b\x0c\x0e-\x7f])*)" @ (?: (?: [a-z0-9] (?: [a-z0-9-] * [a-z0-9]) ? \. ) + [a-z0-9] (?: [a-z0-9-] * [a-z0-9]) ? | \[ (?: (?: 25 [0-5] | 2 [0-4] [0-9] | [01] ? [0-9] [0-9] ? ) \. ) {3} (?: 25 [0-5] | 2 [0-4] [0-9] | [01] ? [0-9] [0-9] ? | [a-z0-9-] * [a-z0-9] : (?: [\x01-\x08\x0b\x0c\x0e-\x1f\x21-\x5a\x53-\x7f] | \[ \x01-\x09\x0b\x0c\x0e-\x7f] ) + ) \] ) \z
```

den offiziellen Standard für EMail-Adressen vollständig umsetzt (ich habe das nicht nachgeprüft). Auf der offiziellen RFC-Seite (<http://www.ex-parrot.com/~pdw/Mail-RFC822-Address.html>) wird ein regulärer Ausdruck mit über 80 Zeilen für das Format von EMail-Adressen angegeben.

Mit **regex-Iteratoren** kann man alle Teilstrings finden, die zu einem regulären Ausdruck passen. Ein *regex*-Iterator für Strings des Datentyps *string* hat den Datentyp *sregex\_iterator*. Für andere Datentypen gibt es entsprechende Iteratoren, die gleich verwendet werden können:

```
using cregex_iterator = regex_iterator<const char*>;
using wcregex_iterator = regex_iterator<const wchar_t*>;
using sregex_iterator = regex_iterator<string::const_iterator>;
using wsregex_iterator = regex_iterator<wstring::const_iterator>;
```

Ein *regex*-Iterator wird mit einem Konstruktor initialisiert, dessen erste beide Argumente Iteratoren auf den Anfang und das Ende des Suchbereichs im String sind. Das dritte Argument ist der reguläre Ausdruck. Der Standardkonstruktor erzeugt einen Wert, der auf das Element nach dem letzten zeigt. Ein solcher Iterator zeigt auf ein Objekt des Datentyps

```
std::smatch match = *next;
```

Dieser Datentyp hat eine Elementfunktion mit dem Namen *str*, die den passenden Teilstring darstellen.

```
string containsInt_100_999_rx = "[1-9][0-9][0-9]";
string s = "123 456 xxx789";
try {
    const regex pattern(containsInt_100_999_rx);
    srege_iterator end;
    for (srege_iterator next(s.begin(), s.end(), pattern); next !=
                                                end; next++)
        cout << "      :" << next->str() << endl;
}
catch (exception& e)
{
    cout << "Exception: "s << e.what() << endl;
}
```

Diese Funktion gibt die Strings "123", "456", und "789" aus.

Falls die in einem regulären Ausdruck angegebenen Kriterien für das Ende im String mehrfach vorkommen, geben die Quantifizierer immer den Teilstring mit der maximalen Länge zurück. Damit man den kürzesten Teilstring erhält, muss man nach dem Quantifizierer noch ein Fragezeichen angeben.

Beispiel: Der String

```
"<head><title>Meine Internetseite< / title>< / head>"
```

passt zu den beiden regulären Ausdrücken

```
"<.+>" und "<.+?>"
```

Mit dem ersten erhält man einen (maximal langen) Teilstring

```
<head><title>Meine Internetseite< / title>< / head>
```

und mit dem zweiten vier minimal lange:

```
<head>
<title>
< / title>
< / head>
```

Die folgende Tabelle enthält die Laufzeiten für die Suche nach allen Zahlen in einem langen String. In den ersten beiden Zeilen wurden diese mit der Funktion *first\_digit\_substring* (siehe Abschnitt 3.2) bestimmt und in der letzten Zeile mit *regex*-Iteratoren:

| Benchmarks Visual Studio 2019.5, Release x64 /O2 |                    |                     |                      |
|--------------------------------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|
| suche Zahlen in <i>string</i>                    | <i>string</i> 1 KB | <i>string</i> 10 KB | <i>string</i> 100 KB |
| <i>string</i> ohne regex                         | 0,000019 Sek.      | 0,00012 Sek.        | 0,0011 Sek.          |
| <i>string view</i> ohne regex                    | 0,000017 Sek.      | 0,00011 Sek.        | 0,0009 Sek.          |
| mit regex-Iteratoren                             | 0,001200 Sek.      | 0,07300 Sek.        | 6,8000 Sek.          |

### Aufgaben 3.8

Schreiben Sie die Lösungsfunktionen in eine wie in Abschnitt 1.2.5 beschriebene Header-Datei (z.B. in die schon in Aufgabe 3.2 angelegte Header-Datei) und rufen Sie diese auf.

Schreiben Sie Funktionen, die für einen Parameter *Line* des Datentyps *string* prüfen, ob er die Anforderungen erfüllt. Übergeben Sie die variablen Bestandteile der Prüfung als Parameter und bauen Sie mit diesen in den Funktionen reguläre Ausdrücke auf.

Bei den Aufgaben d) bis f) sollen zwischen den Sprachelementen wie in C++ beliebig viele Leerzeichen stehen können. Da die Syntax von C++ recht kompliziert ist, muss diese aber nicht komplett berücksichtigt werden. Es reicht, wenn einige der wichtigsten Fälle berücksichtigt werden. Solche Funktionen können dazu verwendet werden, einen Quelltext bzw. eine Textdatei zeilenweise zu lesen und jede Zeile auszugeben, die das entsprechende Kriterium erfüllt. Die regulären Ausdrücke können aber auch im Editor unter *Bearbeiten*|*Suchen* eingegeben werden, um den Quelltext zu durchsuchen.

- Eine Funktion *Contains2* soll *true* zurückgeben, wenn *Line* zwei weitere als Parameter übergebene Strings enthält.
- Eine Funktion *ContainsSpacesBetween2* soll *true* zurückgeben, wenn *Line* zwei weitere als Parameter übergebene Strings enthält, und zwischen diesen beiden nur Leerzeichen kommen.
- Eine Funktion *ContainsSpacesBetween2Words* soll *true* zurückgeben, wenn *Line* zwei weitere als Parameter übergebene Strings als eigenständige Worte enthält, und zwischen diesen beiden nur Leerzeichen kommen.
- Eine Funktion *FunctionCall* soll *true* zurückgeben, wenn *Line* einen als zweiten Parameter übergebenen String enthält und auf diesen nach eventuellen Leerzeichen eine Klammer "(" folgt. Damit kann man prüfen, ob *Line* eine Definition oder einen Aufruf der Funktion mit dem als Parameter übergebenen Namen enthält.
- Eine Funktion *AssignmentOf* soll *true* zurückgeben, wenn in *Line* auf ein Gleichheitszeichen „=" und eventuellen Leerzeichen ein als Parameter übergebener Name folgt. Damit kann man prüfen, ob *Line* eine Zuweisung einer Variablen mit dem als Parameter übergebenen Namen enthält.
- Eine Funktion *ClassDefinition* soll *true* zurückgeben, wenn in *Line* auf „class“ oder „struct“ ein Name folgt. Damit kann man prüfen, ob *Line* eine Klassendefinition enthält.

## 4 Arrays und Container

Bisher haben wir alle Variablen einzeln definiert. Das kann aber ziemlich aufwendig werden, wenn man eine größere Anzahl von Variablen benötigt:

```
int x1, x2, x3, x4, x5; /* 1000 Variablen definieren zu müssen ist
    eine pädagogisch wertvolle Strafarbeit für Studenten, die während
    der Vorlesung im Internet surfen */
```

Auch die Arbeit mit diesen Variablen ist recht umständlich: Da jede nur unter ihrem Namen angesprochen werden kann, ist es nicht möglich, sie alle in einer Schleife zu durchlaufen.

Diese Nachteile lassen sich vermeiden, wenn die Variablen nicht einzeln, sondern gemeinsam als **Array** definiert werden. Ein Array ist eine Zusammenfassung von Variablen desselben Datentyps unter einem einzigen Namen. Die einzelnen Variablen können über den Namen des Arrays und einen **Index** angesprochen werden und werden auch als Elemente des Arrays bezeichnet. Der Index kann ein Ausdruck und damit insbesondere eine Variable sein. Arrays stehen schon seit langer Zeit in den meisten Programmiersprachen zur Verfügung und sind weit verbreitet.

Der Speicherplatz für ein Array kann bei der Kompilation und zur Laufzeit reserviert werden:

- Wenn der Speicherplatz vom Compiler reserviert wird, muss die Anzahl der Elemente bereits zum Zeitpunkt der Kompilation bekannt und deshalb eine Konstante sein.
- Bei einem **dynamisch erzeugten Array** (siehe Abschnitt 6.5.4) wird der Speicherplatz für die Elemente während der Laufzeit reserviert. Die Anzahl der Arrayelemente muss hier keine Konstante, sondern kann auch eine Variable sein.

Mit dem Aufkommen der objektorientierten und generischen Programmierung wurde die C++-Standardbibliothek um **Containerklassen** ergänzt, die wie ein Array verwendet werden können, aber viele Vorteile haben. Sie stellen die Daten intern in einem Array dar und enthalten zahlreiche Elementfunktionen, die oft einfache Lösungen von typischen Aufgaben ermöglichen:

- Bei der Containerklasse **std::array** werden die Daten in einem C-Array gespeichert. Der Speicherplatz für die Elemente wird vom Compiler reserviert und muss eine Konstante sein.
- Bei der Containerklasse **std::vector** (siehe Abschnitt 11.1) werden die Daten in einem dynamischen Array gespeichert. Der Speicherplatz für die Elemente wird automatisch



während der Laufzeit des Programms reserviert. Es ist nicht notwendig, die Anzahl der Elemente vorher (bei der Kompilation oder beim Anlegen des Containers) festzulegen.

Containerklassen sind für die meisten Anwendungen besser geeignet als Arrays, da die Arbeit mit ihnen einfacher und weniger fehleranfällig ist. Da sie aber auf Arrays beruhen und auch viele Gemeinsamkeiten mit ihnen haben, werden Arrays trotzdem ausführlich dargestellt.

## 4.1 Synonyme für Datentypen

Oft möchte man einen Datentyp an mehreren Stellen im Programm einfach durch einen anderen ersetzen können. Das ist mit einem **Synonym** für einen Datentyp möglich. Ein solches Synonym erhält man mit ***typedef*** und ***using***. Damit sind oft auch einfachere Namen für komplexere Datentypen möglich, wie z.B. Funktionstypen. Sowohl ***typedef*** als auch ***using*** definieren keinen neuen Datentyp, sondern nur einen anderen Namen für einen Datentyp. Mit Templates (siehe Kapitel 14) ist man oft noch wesentlich flexibler als mit Synonymen, da man einem Template einen Datentyp als Parameter übergeben kann.

Im Folgenden wird oft das Synonym T verwendet, um zum Ausdruck zu bringen, dass Operationen mit einer Variablen des Datentyps T weitgehend unabhängig vom Datentyp sind.

### 4.1.1 Einfache *typedef*-Deklarationen

Dazu gibt man nach ***typedef*** zuerst einen Datentyp und dann einen Bezeichner an. Dieser Bezeichner ist dann ein neuer Name für den Datentyp und kann danach wie der Datentyp verwendet werden. Bei jeder Verwendung wird es vom Compiler durch den ursprünglichen Datentyp ersetzt.

Beispiel: Mit den Deklarationen

```
typedef unsigned char BYTE;  
typedef unsigned long ULONG;
```

sind die folgenden Variablendefinitionen gleichwertig mit den als Kommentar angegebenen:

```
BYTE b; // gleichwertig mit "unsigned char b;"  
ULONG u; // gleichwertig mit "unsigned long u;"
```

### 4.1.2 Synonyme für Datentypen mit *using*

In C++11 wurde zusätzlich die Möglichkeit aufgenommen, mit ***using*** ein Synonym für einen Datentyp zu definieren. Ein so definierter Name wird oft auch als Typ-Alias bezeichnet. Dazu gibt man nach ***using*** zuerst einen Bezeichner und dann ein Gleichheitszeichen und einen Datentyp an. Dieser Bezeichner ist dann ein neuer Name für den Datentyp und kann danach wie der Datentyp verwendet werden. Bei jeder Verwendung wird er wie bei ***typedef*** vom Compiler durch den ursprünglichen Datentyp ersetzt.

```
using identifier = type-id ;
```

Beispiel: Mit den Deklarationen

```
using BYTE = unsigned char;
using ULONG = unsigned long;
```

sind die folgenden Variablendefinitionen gleichwertig mit den als Kommentar angegebenen:

```
BYTE b; // gleichwertig mit "unsigned char b;"
ULONG u; // gleichwertig mit "unsigned long u;"
```

Bei so einfachen Deklarationen sind Synonyme mit *typedef* und *using* gleichwertig. Bei komplexeren Datentypen ist *using* aber oft vielseitiger und einfacher.

## 4.2 Eindimensionale Arrays

Im Folgenden werden zunächst die bereits seit C verfügbaren und weit verbreiteten Arrays vorgestellt. In der Praxis sollte man aber die Container *std::array* oder *std::vector* bevorzugen. Da diese Container viele Gemeinsamkeiten mit Arrays haben, ist diese Kapitel auch eine Einführung in Container.

### 4.2.1 Arrays im Stil von C

Ein eindimensionales Array kann wie schon in der Programmiersprache C nach dem Schema

```
T D [constant-expression opt]
```

definiert werden. Wenn es darauf ankommt, dass ein Array nach diesem Schema definiert wurde (und nicht mit *std::array*) wird es auch als **C-Array** bezeichnet. Hier ist

- T der Datentyp der Arrayelemente. Das kann ein beliebiger fundamentaler Datentyp (außer *void*), ein Zeigertyp, eine Klasse oder wiederum ein Array sein.
- D der **Name des Arrays** (ein Bezeichner).
- *constant-expression* die **Anzahl der Arrayelemente** (eine Konstante, größer als Null).

Die **Elemente** eines Arrays werden mit dem **Indexoperator** `[]` über ihren **Index** angesprochen: Der Index wird in eckigen Klammern nach dem Namen des Arrays angegeben und muss ein ganzzahliger Ausdruck sein. Jedes Element eines Arrays ist ein Ausdruck des Datentyps, der bei der Definition des Arrays angegeben wurde.

Das **Array**

```
T a[n] // T: ein Datentyp, n: eine ganzzahlige Konstante
```

hat die n Elemente

`a[0], ..., a[n-1]`

Beispiel: Nach den Definitionen

```
int a[10];
double d[20];
bool Primzahlen[30];
std::string str[40];
```

ist

|                            |                                            |
|----------------------------|--------------------------------------------|
| <code>a[9]</code>          | ein Ausdruck des Datentyps <i>int</i> ,    |
| <code>d[0]</code>          | ein Ausdruck des Datentyps <i>double</i> , |
| <code>Primzahlen[1]</code> | ein Ausdruck des Datentyps <i>bool</i> ,   |
| <code>strings[2]</code>    | ein Ausdruck des Datentyps <i>string</i> , |

Es ist in der Regel immer empfehlenswert, für die **Anzahl der Arrayelemente** eine **symbolische Konstante** anzugeben und diese immer dann zu verwenden, wenn man das letzte Element anspricht. Falls es dann einmal notwendig sein sollte, die Größe des Arrays zu ändern, muss nur diese Konstante geändert werden.

Beispiel: Obwohl das Programmfragment

```
int a[10], sum = 0;
...
for (int i = 0; i <= 9; i++) sum = sum + a[i];
```

seinen Zweck durchaus erfüllen kann, ist die folgende Variante meist besser:

```
const int max = 10;
int a[max], sum = 0;
...
for (int i = 0; i < max; i++) sum = sum + a[i];
```

Bei der ersten Variante muss das gesamte Programm nach allen Stellen durchsucht werden, an denen die Elementanzahl verwendet wird. Das kann bei einem größeren Programm recht mühsam werden, insbesondere wenn die Konstante nicht explizit verwendet wird, sondern nur ein abgeleiteter Wert (9 statt 10 in der *for*-Schleife).

Bei der Definition eines Arrays muss darauf geachtet werden, dass seine Größe im Rahmen der zulässigen **Speichergrenzen** liegt. Die Obergrenze von 2 GB für globale Definitionen unter 32-bit Windows und Visual C++ dürfte meist keine Einschränkung darstellen. Für lokale Definitionen liegt die Voreinstellung für die Obergrenze bei 1 MB. Sie kann unter *Projekt|Eigenschaften|Konfigurationseigenschaften|Linker|System* verändert werden.

Beispiel: Die folgende Definition benötigt mehr als 2 GB und führt zu der Compilerfehlermeldung „Automatische Zuordnung überschreitet 2G“.

```
int z[INT_MAX]; // Fehler: Das Array ist zu groß
```

Das nächste Array benötigt mehr als 1 MB und kann global definiert werden. Eine lokale Definition führt zu einem Stack overflow, wenn man die voreingestellte Größe für den Stack nicht erhöht:

```
int z[300000]; // global möglich, aber nicht lokal
```

Im C++-Standard ist ausdrücklich festgelegt, dass der Compiler für die Elemente eines Arrays einen **zusammenhängenden Bereich** im Hauptspeicher reserviert, in dem die Elemente **unmittelbar nebeneinander** (ohne Lücken) liegen. Beim Zugriff auf ein Arrayelement wird seine **Speicheradresse** über die Anfangsadresse des Arrays, den Index und die Größe der Elemente nach der folgenden Formel **berechnet**:

```
&a[i] = &a[0] + i * sizeof(T) // T ist der Datentyp der Arrayelemente
```

Da der Index ein beliebiger ganzzahliger Ausdruck sein kann, akzeptiert der Compiler mit einer *int* Variablen *i* die folgenden Ausdrücke als Indizes:

```
a[i], a[i*i + 19], d[(a[i] + a[j]) / 2]
```

Wenn bei einem Array mit *n* Elementen ein **Index** angegeben wird, der **nicht im Bereich** 0 .. *n*-1 liegt, werden Speicherbereiche angesprochen, die nicht für das Array reserviert sind. Ein solcher Zugriff wird auch als **Pufferüberlauf** (Buffer overrun) bezeichnet. Das kann zu einem undefinierten Verhalten (z.B. einer Zugriffsverletzung) führen.

Beispiel: In Visual C++ werden die Adressen der Variablen manchmal so vergeben, dass *a[-1]* dieselbe Adresse hat wie *sum*:

```
int OutOfBounds()
{
    int sum = 0;
    int a[3];
    for (int i = -1; i<3; i++) a[i] = i; //Fehler für i=-1
    return sum;
}
```

Dann erhält *sum* hier den Wert -1, obwohl dieser Variablen nie ein anderer Wert als Null zugewiesen wird. Allerdings trat dieser Effekt bei mir nur sporadisch auf und war nicht jederzeit reproduzierbar. Randbemerkung: Den Index, unter dem man die Variable *sum* ansprechen kann, erhält man mit Zeigerarithmetik:

```
int x = &sum - &a[0];
```

Ein Pufferüberlauf kann leicht entstehen, wenn man die Arraygrenze verkleinert und vergisst, die Obergrenze in der *for*-Schleife anzupassen. Er ist aber meist nicht leicht zu finden, da das Ergebnis einer solchen Anweisung nicht unmittelbar aus dem Programmtext hervorgeht. Mit etwas Glück wird man durch einen Programmabsturz („Zugriffsverletzung“) darauf hingewiesen. Ohne einen solchen Absturz grübelt man eventuell lange, wieso der Wert von *sum* nicht 0 ist.

Durch die Definition eines Arrays `a` mit `n` Elementen des Datentyps `T` reserviert der Compiler einen **zusammenhängenden Speicherbereich** für `n` Elemente, also `n*sizeof(T)` Bytes. Damit der Compiler den erforderlichen Speicherplatz reservieren kann, muss die Anzahl der Arrayelemente zum Zeitpunkt der Kompilation bekannt und deshalb eine **Konstante** sein. Es ist nicht möglich, die Größe eines Arrays während der Laufzeit des Programms über eine Variable festzulegen oder gar zu verändern. Der **Datentyp** von `a` ist „Array mit `n` Elementen des Datentyps `T`“ oder kurz „`T[n]`“ (z.B. „`int[10]`“).

#### 4.2.2 Arrays des Typs `std::array`

Die seit C++11 nach

```
#include <array> // oder import std.core; (siehe Abschnitt 2.13)
```

im Namensbereich `std` verfügbaren Arrays des Typs `std::array` können wie die schon in C verfügbaren Arrays verwendet werden. Sie werden auch als Arraycontainer fester Größe („fixed size array container“) bezeichnet und basieren intern auf C-Arrays wie „`int a[100]`“, haben aber einige Vorteile gegenüber C-Arrays.

Ein Arraycontainer fester Größe wird wie in

```
std::array<T, N> a; // N muss eine Konstante sein
```

definiert und entspricht dem Array mit `N` Elementen des Datentyps `T`

```
T a[N];
```

Der Speicherplatz für ein `std::array` wird wie bei einem C-Array vom Compiler reserviert. Deshalb muss die Anzahl der Arrayelemente eine Konstante sein. Im Unterschied zu einem C-Array ist dafür aber keine symbolische Konstante notwendig, da diese Anzahl über die Elementfunktion `size` zur Verfügung steht:

```
std::array<T, 10> a;
constexpr int n = a.size(); // n=10
```

Beispiel: Die folgenden Arrays können im Wesentlichen wie die als Kommentar angegebenen Arrays verwendet werden:

```
std::array<int, 10> a;      // wie int a[10];
std::array<double, 20> d;  // wie double d[20];
array<bool, 30> Primzahlen; // wie bool Primzahlen[30];
array<std::string, 40> str; // wie std::string str[40];
```

Eine nicht konstante Anzahl von Arrayelementen hat eine Fehlermeldung des Compilers zur Folge:

```
int M = 18;
char line[M]; //error: Konstante erwartet
```

Um alle Elemente zu durchlaufen, verwendet man bei einem C-Array als Obergrenze die Konstante, die bei der Definition des Arrays angegeben wurde:

```
for (int i = 0; i < N; i++) a[i] = i; // nach int a[N];
```

Bei einem `std::array` kann man `a.size` verwenden:

```
for (int i = 0; i < a.size(); i++) a[i] = i;
```

### 4.2.3 Dynamische Arrays des Typs `std::vector`

Die Containerklasse `vector` ist nach

```
#include <vector> // oder import std.core; (siehe Abschnitt 2.14)
```

verfügbar und hat große Ähnlichkeiten mit einem `std::array`. Ein `std::vector` ist aber vielseitiger, da die Anzahl der Elemente im Unterschied zu einem statischen Array keine Konstante sein muss. Nach der Definition

```
int N = 100; // eine Variable – keine Konstante
std::vector<int> v(N); // ein vector mit N Elementen
```

kann `v` im Wesentlichen wie ein `std::array` verwendet werden:

```
std::array<int, 100> a;
```

Ohne die Angabe einer Elementanzahl bei der Definition

```
std::vector<int> v; // ein vector mit 0 Elementen
```

erhält man einen leeren `vector`. Da ein `vector` intern ein dynamisches Array (siehe Abschnitt 6.5.4) verwendet, kann man in einen `vector` mit Funktionen wie `push_back` Elemente einfügen. Deswegen wird ein `vector` oft ohne eine Anzahl von Elementen definiert.

Beispiel: In den `vector` `v` werden 100 Elemente mit den Werten 0 bis 99 eingefügt:

```
for (int i = 0; i < 100; i++)
    v.push_back(i);
```

Diese kann man wie bei einem Array mit dem Indexoperator ansprechen. Die Anzahl der Elemente erhält man mit der Elementfunktion `size`:

```
int Summe = 0;
for (int i = 0; i < v.size(); i++)
    Summe = Summe + v[i];
```

Falls eine Liste von Werten, deren Anzahl sich erst zur Laufzeit ergibt, als Parameter an eine Funktion übergeben oder von einer Funktion zurückgeben werden soll, ist dafür ein `vector` oft der richtige Rückgabetyp.

Beispiel: Wenn eine Funktion alle Teiler einer Zahl zurückgeben soll, kann man einen *vector* als Rückgabewert verwenden:

```
std::vector<int> alleTeiler(int n)
{
    std::vector<int> p;
    for (int i = 1; i <= n / 2; i++)
        if (n % i == 0)
            p.push_back(i);
    return p;
}
```

Die Klasse *vector* wird in Abschnitt 11.1.1 ausführlich vorgestellt.

Die Werte eines Arrays oder eines *vector* kann man im **Debugger** anzeigen, wenn man mit der Maus über den Namen des Arrays fährt oder das Array in eines der Auto-, Lokal- oder Überwachen-Fenster übernimmt:

```
int a1[5] = { 1, 2, 3, 4, 5 };
std::array<int, 5> a2 = { 1, 2, 3, 4, 5 };
```

| Name | Wert                         | Typ |
|------|------------------------------|-----|
| ▲ a1 | 0x003f2... int[5]            |     |
| [0]  | 1                            | int |
| [1]  | 2                            | int |
| [2]  | 3                            | int |
| [3]  | 4                            | int |
| [4]  | 5                            | int |
| ▲ a2 | { size=5 } std::array<int,5> |     |
| [0]  | 1                            | int |
| [1]  | 2                            | int |
| [2]  | 3                            | int |
| [3]  | 4                            | int |
| [4]  | 5                            | int |

### Aufgaben 4.2.3

Schreiben Sie die Lösungsfunktionen in eine wie in Abschnitt 1.2.5 beschriebene Header-Datei (z.B. mit dem Namen „Loesungen-Kap-4.h“) und rufen Sie diese auf.

1. Geben Sie an, welche der mit a) bis d) bezeichneten Anweisungen syntaktisch korrekt sind. Falls ja, beschreiben Sie das Ergebnis dieser Anweisungen.

```
int a[10];
for (int i = 1; i <= 10; i++) a[i] = 0; // a)
int b[2], c[2];
b[0] = 0; b[1] = 1;
c = b; // b)
int x = b[b[b[0]]]; // c)
c[0] = 0; c[1] = 1;
if (b == c) x++; // d)
```

Ändern sich Ihre Antworten, wenn Sie die Definitionen der Arrays durch Arrays des Typs *std::array* ersetzen?

```
std::array<int,10> a;
std::array<int, 10> b, c;
```

2. Wenn man die Primzahlen unter den ersten 100 Zahlen bestimmen will, kann man ein Verfahren verwenden, das nach dem griechischen Mathematiker Eratosthenes als **Sieb des Eratosthenes** benannt ist: In einer Liste der Zahlen 1 bis 100 streicht man nacheinander zuerst alle Vielfachen von 2 ab 2, dann alle Vielfachen von 3 ab 3, 5 usw. Die Zahlen, die dabei übrig bleiben, sind dann die Primzahlen.

Realisieren Sie dieses Verfahren mit einem booleschen Array, dessen Werte zunächst alle auf *true* gesetzt werden sollen. Die Anzahl der Arrayelemente soll mit möglichst geringem Aufwand auf einen anderen Wert als 100 gesetzt werden können.

Formulieren Sie Ihre Lösung so, dass Sie die Definition des Arrays durch jede der folgenden Varianten ersetzen können:

- a) mit einem *std::array*
  - b) mit einem C-Array
  - c) mit einem *std::vector*
  - d) Überarbeiten Sie eine Kopie Ihrer Lösung von a) und c) so, dass nicht mit dem Indexoperator, sondern mit *at* auf die Elemente zugegriffen wird.
3. Überarbeiten Sie die Funktion *tokenize\_0* von Aufgabe 3.2, 3. so, dass sie die gefundenen Teilstrings in einem *vector* zurückgibt.
4. Bei manchen Problemen findet man eine explizite Lösung nur schwierig oder überhaupt nicht. Dann können Simulationen hilfreich sein. Sind diese mit Zufallszahlen verbunden, bezeichnet man sie auch als **Monte-Carlo-Simulationen** (nach dem Spielerparadies).

Schreiben Sie ein Programm zur Simulation des **Geburtstagsproblems von Mises** (siehe Aufgabe 2.5.6). Sie können dazu folgendermaßen vorgehen:

Ein Array mit 365 Elementen soll die Tage eines Jahres darstellen. Mit einem Zufallszahlengenerator (z.B. *rand()*) wird dann für jede der *n* Personen ein Geburtsdatum ermittelt und im Array für die Tage ein Zähler hochgesetzt. Falls nach *n* Wiederholungen mindestens ein Zähler den Wert 2 oder mehr hat, entspricht das zwei oder mehr Personen, die an einem Tag Geburtstag haben. Diese Vorgehensweise wiederholt man dann mehrfach (z.B. 1000-mal).

5. a) Geben Sie für die Funktion

```
double Horner(double x)
{ // p: Array mit den Koeffizienten des Polynoms
  const int n = 2; // Der Grad des Polynoms
  double p[n + 1] = { 17,0,3 }; // Koeffizienten von 17+3*x^2
  double s = 0;
  for (int i = 0; i < n + 1; i++)
    s = s*x + p[n - i];
  return s;
}
```



mit einem symbolischen Ablaufprotokoll die Werte

Horner(x) mit n=0

Horner(x) mit n=1

Horner(x) mit n=2

- b) Mit vollständiger Induktion kann man beweisen, dass die Funktion *Horner* für ein Array mit den Elementen  $p[n]$ ,  $p[n-1]$ , ...,  $p[0]$  den Wert des Polynoms

$$s = p[n] \cdot x^n + p[n-1] \cdot x^{n-1} + \dots + p[1] \cdot x + p[0]$$

berechnet. Falls Ihnen das nicht gelingt, machen Sie mit c) weiter

- c) Da die Sinus-Funktion durch die Taylor-Reihenentwicklung

$$\sin(x) = x/1 - x^3/3! + x^5/5! - x^7/7! + x^9/9! - \dots$$

angenähert wird, kann man mit der Funktion *Horner* einen Näherungswert für die Sinus-Funktion berechnen.

Ersetzen Sie in einer Kopie (z.B. mit dem Namen *Sinus*) von *Horner* die Array-elemente von  $p$  durch Werte, so dass *Sinus(x)* den Wert dieses Polynoms zurückgibt. Vergleichen Sie die Ergebnisse für 0.1, 0.2 usw. bis 3.1 mit der Funktion *sin* aus `<cmath>`.

#### 4.2.4 Arrays mit *std::span* als Parameter übergeben

Das seit C++20 nach

```
#include <span>
```

verfügbare Klassen-Template *std::span* kann einen zusammenhängenden Speicherbereich darstellen. Dazu gehören C-Arrays, dynamische Arrays, *std::array* und *std::vector*. In einem *std::span* wird dieser Bereich (wie bei einem *string\_view*, siehe Abschnitt 3.5) durch die Anfangsadresse und die Länge dargestellt.

Für einen Parameter des Typs *std::span<T>* kann als Argument ein Array oder *vector* mit Elementen des Typs *T* übergeben werden. Da ein *span* nur zwei Werte des Typs *int* enthält, ist diese Parameterübergabe mit keinem unnötigen Zeitaufwand verbunden.

Beispiel: Die Funktion

```
void use_span(std::span<int> s)
{
    std::cout << "size=" << s.size() << std::endl;

    for (const int& i : s)
        std::cout << i << " ";
    std::cout << std::endl;
}
```

kann mit den folgenden Argumenten aufgerufen werden:

```
int a[2] = { 1,2 };
use_span(a); // size=2

int* p = new int[3]{ 1,3,5 };
use_span({ p,3 }); // size=3

std::array<int, 4> b = { 1,3,5,7 };
use_span(b); // size=4

std::vector<int> v = { 1,3,5,7,9 };
use_span(v); // size=5
```

Die ersten beiden Beispiele zeigen, wie man ein Array mit einem *span* wie einen Container der Standardbibliothek durchlaufen kann. mit den folgenden Argumenten aufgerufen werden:

Beim Zugriff auf einen nicht zulässigen Index eines *span* wird von Visual Studio im Debug-Modus eine Exception ausgelöst.

Mit einem Parameter des Typs *span* ist oft eine bessere statische Analyse möglich. Deshalb empfehlen die C++ Core Guidelindes (siehe Abschnitt 2.13) oft, diese als Parameter zu verwenden.

#### 4.2.5 Die Initialisierung von Arrays bei ihrer Definition

Ein Array kann bei seiner Definition mit Werten in geschweiften Klammern **initialisiert** werden. Mehrere Werte in einer solchen Liste werden durch Kommas getrennt. Ihre Zuordnung erfolgt dabei von links nach rechts an das erste, zweite usw. Arrayelement. Falls die Liste weniger Ausdrücke enthält als das Array Elemente hat, werden die übrigen Arrayelemente mit dem Wert 0 initialisiert, wenn sie einen fundamentalen Datentyp haben. Falls ihr Datentyp eine Klasse ist, wird ihr sogenannter Standardkonstruktor aufgerufen.

Bei einem Array eines vordefinierten Elementtyps (z.B. *int*) werden ohne eine solche Liste die Elemente eines globalen Arrays mit 0 initialisiert, und die eines lokalen Arrays sind unbestimmt. Bei einem Array mit Elementen eines Klassentyps werden ohne eine solche Liste die Elemente immer mit ihrem Standardkonstruktor initialisiert, unabhängig davon, ob das Array global oder lokal definiert wird.

Beispiel: Nach den Definitionen

```
int a1[3] = { 1,2 }; // a1[0]==1, a1[1]==2, a1[2]==0
int a2[2] = { 0 };  // a2[0]==0, a2[1]==0
```

haben die Elemente der Arrays die als Kommentar angegebenen Werte. Ohne die Initialisierungsliste wären die Werte bei einem lokalen Array unbestimmt.

Ein *std::array* oder ein *std::vector* kann mit derselben Syntax initialisiert werden.

```
std::array<double, 5> a = { 1,2,3,4,5 };
std::vector<int> v = { 6,7,8 };
```

Ein **Array** mit Elementen des Datentyps **char** kann sowohl mit einzelnen Zeichen als auch mit einem Stringliteral (siehe Abschnitt 6.6) initialisiert werden:

```
char Ziffern1[5] = { '0','1','2','3','4' };
char Ziffern2[6] = "01234";
```

Allerdings sind diese beiden Initialisierungen nicht gleichwertig: Der Compiler fügt bei einem Stringliteral immer automatisch ein `'\0'` an, um das Ende des Strings zu kennzeichnen. Deshalb reichen 5 Zeichen bei *Ziffern2* nicht aus. Bei der Initialisierung mit einer Folge von Zeichen wird dagegen der `'\0'`-Terminator nicht angefügt. Gibt man den String *Ziffern1* aus, werden alle Zeichen bis zum nächsten `'\0'` (irgendwo im Hauptspeicher) ausgegeben. Durch die folgende Initialisierung erhält *a* dieselben Elemente wie *Ziffern2*:

```
char a[6] = { '0','1','2','3','4','\0' };
```

Ein initialisiertes Array kann auch **ohne eine Elementanzahl** definiert werden. Es enthält dann so viele Elemente, wie Ausdrücke in der Initialisierungsliste angegeben werden:

```
char a1[] = { '0','1','2' }; // sizeof(a1)==3
char s1[] = "012";          // sizeof(s1)==4
```

Damit besteht *a1* aus 3 und *s1* aus 4 Zeichen (einschließlich `'\0'`). Ein ohne eine Elementanzahl definiertes Array muss initialisiert werden. Die folgende Definition wird vom Compiler zurückgewiesen:

```
int a[]; // error: Unbekannte Größe
```

### Aufgaben 4.2.5

1. Welche Werte haben die Elemente dieser Arrays nach ihrer Definition?

```
int ai0[3]; // global

void InitArrays()
{
    int ai1[3]; // lokal
    int ai2[3] = { 1, 2, 3 };
    int ai3[3] = { 1, 2 };
    int ai4[3] = {};
}
```

2. Für Funktionen, die nur mit relativ wenigen *int*-Argumenten aufgerufen werden, kann man die Funktionswerte auch im Quelltext in ein Array schreiben und dann beim Aufruf der Funktion den Wert aus dem Array zurückgeben. Diese Technik gehört (neben *constexpr*-Funktionen oder rekursiven Funktions-Templates) zu den schnellsten Möglichkeiten, einen Funktionswert zu bestimmen.

Schreiben Sie eine Funktion *Fibonacci1*, die für Argumente *i* im Bereich 0..9 die *i*-te Fibonacci-Zahl (0,1,1,2,3,5,8,13,21,34) aus einem Array zurückgibt.

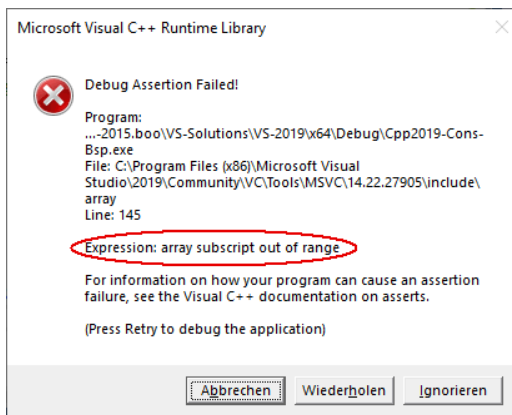
#### 4.2.6 Vorteile von `std::array` und `std::vector` gegenüber C-Arrays

Viele Aufgaben kann man sowohl mit einem C-Array, einem `std::array` und einem `std::vector` lösen. Wenn man die Qual der Wahl hat, ist die Entscheidung für einen `std::vector` oft die beste:

- Ein `std::vector` ist der vielseitigste Datentyp, der oft auch die einfachste Lösung ermöglicht. Im C++-Standard (Abschnitt 22.2.3.2. Sequence Containers) wird empfohlen, diesen Container zu wählen, falls keine triftigen Gründe dagegensprechen. Und obwohl der Standard nur selten bestimmte Sprachelemente bevorzugt, wird hier klar Stellung bezogen: Bei einer Entscheidung für einen anderen Container als einen `vector` soll man das extra begründen: „leave a comment to explain if you choose from the rest!“
- Falls die Anzahl der Elemente bereits bei der Kompilation bekannt sind, kann man auch `std::array` verwenden.
- C-Arrays sollte man vermeiden.

Die wichtigsten Vorteile eines `std::array` bzw. `std::vector` gegenüber einem C-Array sind:

1. Wenn man in Visual Studio mit einem **unzulässigen Index** auf ein Element eines `std::array` zugreift, erhält man im Debug-Modus eine Fehlermeldung wie



Das *i*-te Element eines `std::array` und `std::vector` erhält man nicht nur mit `a[i]`, sondern auch mit `a.at(i)`. Wenn man `at` mit einem unzulässigen Index verwendet, wird sowohl im Debug- als auch im Release-Modus eine Exception ausgelöst.

Beispiel: Da `a` kein Element mit dem Index 10 hat, wird durch `a.at(10)` eine Exception ausgelöst,

```
std::array<int, 10> a;
try {
    int x = a.at(10); // wie a[10]; a hat keinen Index 10
}
```

```

catch (std::exception& ex)
{
    cout << ex.what() << endl; // invalid array<T, N>
}                               // subscript

```

2. Mit dem Operator *sizeof* erhält man die Anzahl der von einem C-Array belegten Bytes, wenn bei *sizeof* die Array-Variable angegeben wird. Das gilt aber nicht für ein Array, das als Parameter übergeben wird. Da ein Array bei einer Parameterübergabe immer als Zeiger behandelt wird, erhält man in der Funktion unabhängig von der Arraygröße immer den Wert für einen Zeiger (*sizeof(void\*)*).

Beispiel: Ruft man *sizeof* im Gültigkeitsbereich der Array-Variablen auf, erhält man die Anzahl der belegten Bytes:

```

int a[10];
constexpr int s = sizeof(a); // s=40

```

Die Funktion *return\_sizeof* gibt dagegen immer die Größe eines Zeigers zurück:

```

constexpr int return_sizeof(int* p) {
    return sizeof(p);
}

constexpr int sa = return_sizeof(a); // 8 mit x64

```

Diese Unannehmlichkeit bestehen bei einem *std::array* oder *std::vector* nicht. Hier erhält man die Größe immer mit der Funktion *size*.

3. Ein C-Array wird vom Compiler als konstanter Zeiger auf das erste Element behandelt. Deshalb sind für solche Arrays keine **Zuweisungen** möglich:

```

int a[2];
int b[2];
a = b; // Fehler: a ist kein änderbarer lWert (d.h. keine Variable)

```

Ein *std::array* ist dagegen für jeden Datentyp und jede Elementanzahl ein eigener Datentyp, für den Zuweisungen möglich sind.

```

std::array<int, 2> c;
std::array<int, 2> d;
c = d; // Da c und d gleich viel Elemente haben, geht das

```

Da die Anzahl der Elemente zum Datentyp eines *std::array* gehört, haben die beiden Variablen *a* und *b* verschiedene Datentypen und können einander nicht zugewiesen werden:

```

std::array<int, 2> e;
std::array<int, 3> f;
e = f; // Fehler: e und f haben verschiedene Datentypen

```

Ausdrücke des Typs `std::array` können mit `==` auf Gleichheit geprüft werden, wenn sie denselben Datentyp haben.

4. Ein *vector* kann unabhängig von der Anzahl seiner Elemente als Parameter an eine Funktion übergeben werden, und auch von einer Funktion zurückgegeben werden (siehe Abschnitt 4.2.3).

Mit einem C-Array ist die Übergabe umständlicher: Da ein gewöhnliches Array vom Compiler als Zeiger auf das erste Element behandelt wird, muss man die Anzahl der Arrayelemente als zusätzlichen Parameter übergeben. Da dieser Zeiger ein konstanter Zeiger ist, an den keine Zuweisung möglich ist, kann ein gewöhnliches Array nicht von einer Funktion zurückgegeben werden.

Auch für ein `std::array` ist die Übergabe als Parameter und die Rückgabe aus einer Funktion umständlicher als mit einem `std::vector`. Da ein Wert des Typs `std::array` an eine Variable desselben Typs zugewiesen werden kann, kann ein `std::array` auch als **Parameter** an eine Funktion übergeben und als Rückgabewert zurückgegeben werden.

```
std::array<int, 10> verdopple(std::array<int, 10> a)
{
    for (int i = 0; i < a.size(); i++)
        a[i] = 2 * a[i];
    return a;
}
```

Das Argument für einen Parameter des Typs `std::array` muss aber dieselbe Anzahl von Elementen enthalten und diese müssen auch denselben Datentyp haben. Der Aufruf mit einem `std::array` mit einer anderen Anzahl von Elementen führt zu einer Fehlermeldung des Compilers:

```
std::array<int, 11> a11;
verdopple(a11); // Fehler: Keine Konvertierung möglich
```

Damit man ein `std::array` mit einer beliebigen Anzahl von Elementen übergeben kann, muss man die Funktion als Funktions-Template mit einem Nicht-Typ-Parameter (siehe Abschnitt 14.1.3) schreiben:

```
template<int N>
std::array<int, N> verdopple_n(std::array<int, N> a)
{
    for (int i = 0; i < a.size(); i++)
        a[i] = 2 * a[i];
    return a;
}
```

Damit ist der Aufruf möglich:

```
verdopple_n(a11);
```

Bei mehrdimensionalen C-Arrays ist die Parameterübergabe viel umständlicher als mit einem mehrdimensionalen `std::array`.

Die Laufzeit bei einem `std::array` sollte eigentlich gleich sein wie die mit einem C-Array. Für Algorithmen der Standardbibliothek wie `std::sort` trifft das auch zu:

| Benchmarks Visual Studio 2019.5, x64, Release /O2 |            |                    |                  |
|---------------------------------------------------|------------|--------------------|------------------|
| n=100'000                                         | int a[n]   | std::array<int, n> | std::vector<int> |
| <code>std::sort</code>                            | 0,006 Sek. | 0,006 Sek.         | 0,006 Sek.       |

Für selbstdefinierte Algorithmen (hier der Auswahlsort, siehe Abschnitt 4.2.7) wurden aber auch kleine Abweichungen beobachtet:

| Benchmarks Visual Studio Release /O2 |                    |                   |                   |                  |                  |
|--------------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|
| Auswahlsort<br>n=100000              | C-Array<br>int a[] | vector<int><br>[] | vector<int><br>at | std::array<br>[] | std::array<br>at |
| VS 2019, x64                         | 5,5 Sek.           | 5,5 Sek.          | 11 Sek.           | 4,8 Sek.         | 11 Sek.          |

#### 4.2.7 Ein einfaches Sortierverfahren (Auswahlsort)

Die Arbeit mit Arrays soll am Beispiel eines einfachen **Sortierverfahrens** illustriert werden. Um die ersten  $n$  Elemente eines Arrays  $a$  (z.B. des Datentyps `int`) aufsteigend zu sortieren, kann man folgendermaßen vorgehen:

- Zuerst sucht man im Indexbereich  $0..n-1$  nach dem Index des kleinsten Elements:

```
int min = 0;
for (int j = 1; j <= n - 1; j++)
    if (a[j] < a[min]) min = j;
```

Danach vertauscht man  $a[0]$  mit  $a[\text{min}]$ , so dass das kleinste Element in Position 0 steht.

- Diese Vorgehensweise wiederholt man für die Indexbereiche  $1 .. n-1$ ,  $2 .. n-1$  bis schließlich  $n-2 .. n-1$ . Dadurch wird sukzessive das zweitkleinste Element an die Position 1, das drittkleinste an die Position 2 übertragen usw.

Dieses Sortierverfahren wird als **Sortieren durch Auswahl** bezeichnet und für die ersten  $n$  Elemente eines Arrays  $a$  durch diese Anweisungen beschrieben:

```
const int max_a = 10;
int a[max_a] = { 1,6,2,5,3,4,0 }; //oder std::array<int, 10> a = ...
int n = 7; // Anzahl der zu sortierenden Elemente

for (int i = 0; i < n - 1; i++)
{
    int min = i;
    for (int j = i + 1; j < n; j++)
        if (a[j] < a[min]) min = j;
```

```

int x = a[i];
a[i] = a[min];
a[min] = x;
}

```

Offensichtlich ergibt sich die Anzahl der Vergleiche „ $a[j] < a[\text{min}]$ “ durch

$$(n-1) + (n-2) + \dots + 3 + 2 + 1 = (n-1) * n/2 = n^2/2 - n/2$$

Die Anzahl der Zuweisungen „ $\text{min}=j$ “ ist im Durchschnitt etwa halb so groß wie die Anzahl der Vergleiche. Deswegen ist der Zeitaufwand für das Sortieren eines Arrays eine quadratische Funktion der Elementanzahl: Eine Verdoppelung der Elementanzahl wird zu einem vierfachen Zeitaufwand für das Sortieren führen. Später werden noch andere Sortierv Verfahren vorgestellt (z.B. der *sort*-Algorithmus der Standardbibliothek, siehe Abschnitt 15.8.2), die ein wesentlich besseres **Zeitverhalten** haben als dieser Auswahl sort.

### 4.3 Arrays als Container

Datenstrukturen, mit denen man andere Daten speichern kann, werden auch als **Container** bezeichnet. Im Folgenden werden einige einfache Operationen vorgestellt, mit denen ein Array *a* zur Speicherung von Daten verwendet werden kann.

Falls die Daten erst während der Laufzeit des Programms anfallen, muss die Anzahl der Arrayelemente, die im Folgenden als *maxElements* bezeichnet wird, so groß gewählt werden, dass sie möglichst ausreicht. Das kann mit einer Verschwendung von Speicherplatz verbunden sein, wenn die anfallenden Datenmengen starken Schwankungen unterworfen sind. Bei einem C-Array muss *maxElements* eine Konstante sein. Bei einem dynamisch erzeugten Array (siehe Abschnitt 6.5.4) kann *maxElements* auch eine Variable sein.

Damit man weiß, wie viel Elemente das Array enthält, definiert man eine Variable, die immer diese Anzahl enthält. Im Folgenden wird sie als *nElements* bezeichnet. Diese Variable wird beim Programmstart auf 0 gesetzt, bei jedem Hinzufügen eines Elements um 1 erhöht und bei jedem Entfernen eines Elements um 1 reduziert. Bei jedem Zugriff auf ein Arrayelement  $a[i]$  muss man dann darauf achten, dass *i* im Bereich der zulässigen Indizes liegt. Der Container enthält dann die folgenden Elemente:

$a[0], a[1], \dots, a[n\text{Elements}-1]$

Im Folgenden werden drei verschiedene Container auf der Basis von Arrays vorgestellt.

#### 1. Ein nicht sortiertes Array

Bei einem solchen Container kann man die elementaren Operationen Einfügen, Löschen und Suchen folgendermaßen realisieren:



- Neue Daten kann man dem Array *a* dadurch **hinzufügen**, dass man die neuen Daten *a[nElements]* zuweist und *nElements* um 1 erhöht. Dabei muss man darauf achten, dass *nElements* nicht größer wird als *maxElements-1*.
- Das Element an der Position *i* kann man dadurch **löschen**, indem man *a[i]* durch *a[nElements-1]* überschreibt und *nElements* um 1 reduziert. Hier muss man darauf achten, dass *nElements* nicht kleiner wird als 0.
- Wenn man in einem solchen Array nach einem Element mit einem bestimmten Merkmal sucht, muss man alle Elemente des Arrays auf dieses Merkmal prüfen. Diese Vorgehensweise wird auch als **lineares Suchen** bezeichnet, weil alle Arrayelemente der Reihe nach durchsucht werden.

## 2. Ein sortiertes Array

Bei einem großen Array kann das lineare Suchen relativ zeitaufwendig sein. Diesen Zeitaufwand kann man verringern, wenn man das **Array sortiert** (z.B. mit dem Auswahlort, siehe Abschnitt 4.2.7). In einem sortierten Array kann man dann mit der Technik des **binären Suchens** nach einem Element suchen.

Dabei kann man folgendermaßen vorgehen: Der Bereich, in dem sich das gesuchte Arrayelement befinden muss, falls es vorhanden ist, wird durch die Werte von zwei *int*-Variablen *L* und *R* beschrieben, die seine linke und rechte Grenze bezeichnen.

1. Am Anfang erhält *L* den Wert 0 und *R* den Wert *nElements-1*.
2. Eine weitere *int*-Variable *M* erhält als Wert den Index des mittleren Arrayelements.

$$M = (L + R)/2;$$

Dann wird überprüft, ob das *M*-te Arrayelement kleiner als der gesuchte ist.

- Trifft dies zu, wird die weitere Suche auf den Bereich beschränkt, der links durch *M+1* begrenzt wird.
- Trifft dies dagegen nicht zu, wird geprüft ob das *M*-te Arrayelement größer als der gesuchte Wert ist. In diesem Fall wird die weitere Suche auf den Bereich beschränkt, der rechts durch *M-1* begrenzt ist.
- Trifft auch diese Bedingung nicht zu, ist das gesuchte Element gefunden.

Die Schritte unter 2. werden wiederholt, bis das gesuchte Element gefunden ist oder sich herausstellt, dass kein Element mit dem gesuchten Wert existiert. Dieser Fall ist dann eingetreten, wenn der Suchbereich leer ist, d.h.  $L > R$  gilt.

Da der Suchbereich bei diesem Verfahren schrittweise halbiert wird, bezeichnet man es auch als **binäres Suchen**. In einem Array mit *n* Elementen besteht der Suchbereich nach

- einem Schritt aus weniger als  $n/2$  Elementen, nach
- zwei Schritten aus weniger als  $(n/2)/2 = n/2^2$  Elementen, und nach
- *s* Schritten aus weniger als  $n/2^s$  Elementen.

Falls man das gesuchte Element nicht schon vorher findet, kann man die Suche spätestens dann abbrechen, wenn der Suchbereich leer ist, d.h. weniger als ein Element enthält. Diese Bedingung tritt spätestens nach

$$n/2^s < 1 \text{ oder } 2^s > n$$

Schritten ein. Da  $2^{10} = 1024$  und  $2^{20} > 1\,000\,000$  ist, werden Arrays mit 1000 bzw. 1 000 000 Elementen in höchstens 10 bzw. 20 Schritten durchsucht.

Damit haben wir bisher schon drei Algorithmen kennen gelernt, deren Zeitverhalten sich grundlegend unterscheidet:

- Beim binären Suchen ist der Aufwand proportional zum Logarithmus der Elementanzahl.
- Beim linearen Suchen ist der Aufwand proportional zur Anzahl der Elemente.
- Beim Auswahlort ist der Aufwand proportional zum Quadrat dieser Anzahl.

Wenn man einem sortierten Array neue Elemente **hinzufügen** will, kann man das neue Element nicht einfach am Ende anfügen, da sonst die Sortierfolge anschließend meist nicht mehr erhalten wäre. Damit sie erhalten bleibt, kann man folgendermaßen vorgehen:

1. Zunächst bestimmt man die Position für das neue Element.
2. Dann verschiebt man alle Elemente ab dieser Position um eine Position nach hinten.
3. Dann schreibt man das Element an die frei gewordene Position.

Um ein Element an einer bestimmten Position zu **löschen**, kann man alle Elemente ab dieser Position um eine Position nach vorne verschieben.

Dieser Vergleich zeigt, dass ein sortiertes Array dann effizient ist, wenn oft in ihm gesucht wird, aber nur relativ wenige Elemente eingefügt oder gelöscht werden. Wenn dagegen relativ wenige Suchoperationen stattfinden, aber relativ oft Elemente eingefügt oder gelöscht werden, kann es günstiger sein, mit einem unsortierten Array zu arbeiten.

### Aufgaben 4.3

1. Bei dieser Aufgabe geht es vor allem darum, eine unbestimmte Anzahl von Daten zu bearbeiten, die während der Laufzeit des Programms anfallen.

Da es etwas aufwendig ist, die Daten während der Laufzeit vom Benutzer einzulesen (Sie müssten für jede Funktion eine Menüoption anbieten und dann die Werte einlesen), können Sie diese Funktionen etwas einfacher testen, indem Sie sie hartkodiert aufrufen. Dann müssen z.B. nach den drei Aufrufen *pushBack(1)*, *pushBack(2)* und *pushBack(3)* von *showArray* die Werte 1, 2, 3 angezeigt werden.

Falls diese Aufgaben im Rahmen einer Gruppe (z.B. in einer Vorlesung) bearbeitet werden, können einzelne Teilaufgaben auch auf verschiedene Teilnehmer verteilt werden. Die Lösungen der einzelnen Teilaufgaben sollen dann in einem gemeinsamen Projekt zusammen funktionieren.

Die Teilaufgaben a) bis f) betreffen unsortierte Arrays:

- a) Eine Funktion **pushBack** soll die als Parameter übergebenen Daten an die nächste freie Position des Arrays schreiben. Diese Funktion soll von einer Funktion mit dem Namen *Einfügen* aufgerufen werden.
- b) Eine Funktion **showArray** soll die Daten des Arrays ausgeben.
- c) Erstellen Sie für ein Array mit 3 Elementen ein **Ablaufprotokoll** für 4 Aufrufe der Funktion **pushBack** mit den Argumenten „10“, „11“, „12“ und „13“. Formulieren Sie eine **Bedingung**, die nach jedem Aufruf dieser Funktion gilt
- d) Eine Funktion **findLinear** soll ab einer als Parameter übergebenen Position nach einem ebenfalls als Parameter übergebenen Wert im Array suchen. Falls ein Arrayelement mit diesem Wert gefunden wird, soll dessen Position zurückgegeben werden, und andernfalls der Wert *nElements*. Diese Funktion soll in einer Funktion mit dem Namen *Linear\_suchen* aufgerufen werden und alle Werte des Arrays ausgegeben, die gleich dem Argument von *Linear\_suchen* sind.
- e) Eine Funktion **eraseElement** soll das Arrayelement an der als Parameter übergebenen Position löschen. Diese Funktion soll beim Anklicken von einer Funktion mit dem Namen *Löschen* aufgerufen werden und das erste Element im Array löschen, dessen Wert das Argument ist.
- f) Eine Funktion **Auswahlsort** soll das Array mit dem Auswahlort sortieren.

Die Aufgaben g) bis i) betreffen sortierte Arrays. Falls das Array vor der Ausführung einer dieser Operationen sortiert war, soll es auch nachher noch sortiert sein.

- g) Eine Funktion **findBinary** soll den als Parameter übergebenen Wert binär im Array suchen. Falls er gefunden wird, soll seine Position zurückgegeben werden, und andernfalls der Wert *nElements*. Rufen Sie diese Funktion in einer Funktion *Binär\_suchen* auf und zeigen Sie die Position des als Argument übergebenen Wertes im Array an, falls er vorhanden ist.
- h) Eine Funktion **insertSorted** soll einen als Parameter übergebenen Wert einfügen. Diese Funktion soll von einer Funktion mit dem Namen *Sortiert\_Einfügen* aufgerufen werden. Die Argumente für *insertSorted* können hartkodiert angegeben werden.
- i) Kann die Einfügeposition in h) mit **findBinary** gesucht werden?
- j) Eine Funktion **eraseSorted** soll das Arrayelement an der als Parameter übergebenen Position löschen. Beim Aufruf in einer Funktion *Sortiert\_Löschen* soll das erste Element im Array gelöscht werden, das als Argument übergeben wurde.
- k) Schreiben Sie für die Funktionen aus a) bis j) Testfunktionen wie in Abschnitt 2.6.5.

## 4.4 Mehrdimensionale Arrays Θ

Ein **mehrdimensionales C-Array** mit Elementen eines Datentyps T wird nach dem Schema

T D [ *constant-expression opt* ] . . . [ *constant-expression opt* ]

mit mehreren Paaren von eckigen Klammern mit Konstanten definiert. Die Anzahl dieser Paare ist dabei im Prinzip unbegrenzt und wird auch als **Dimension** bezeichnet.

Beispiel: Mit den Konstanten

```
const int m = 2, n = 3, p = 4;
```

wird durch

```
int a[m][n];
double d[m][n][p];
```

ein zweidimensionales Array `a` mit  $m \cdot n$  Elementen und ein dreidimensionales Array `d` mit  $m \cdot n \cdot p$  Elementen definiert.

Ein  $n$ -dimensionales Array ist ein eindimensionales Array, dessen Elemente  $(n-1)$ -dimensionale Arrays sind. Nach den letzten Definitionen ist

`a` ein Array mit  $m$  Elementen, die selbst Arrays mit  $n$  Elementen sind, und  
`d` ein Array mit  $m$  Elementen, die selbst Arrays mit  $n \cdot p$  Elementen sind.

Ein **mehrdimensionales** `std::array` erhält man mit verschachtelten `std::array`'s:

```
array< array<int, Max>, Max> b;
```

Zweidimensionale Arrays werden auch als Tabellen oder Matrizen bezeichnet. Die Anzahl der Elemente in der ersten Dimension sind dann die Zeilen und die der zweiten die Spalten.

Da der Indexoperator `[]` linksassoziativ ist

```
a[i][j]=(a[i])[j]
```

können die Elemente dieser Arrays dann z.B. so angesprochen werden:

```
a[1][2]      // eine Variable des Datentyps int
d[1][2][3]   // eine Variable des Datentyps double
b[1][2] = 17;
```

Da die Elemente eines eindimensionalen Arrays an unmittelbar **aufeinander folgenden Adressen** im Hauptspeicher abgelegt werden, belegen Arrayelemente, bei denen sich der letzte Index um 1 unterscheidet, benachbarte Speicherplätze. Die Elemente von `a` liegen deshalb in der Reihenfolge

```
a[0][0] a[0][1] a[0][2] a[1][0] a[1][1] a[1][2]
```

nacheinander im Hauptspeicher.

Mehrdimensionale Arrays können bei ihrer Definition durch verschachtelte Initialisierungslisten initialisiert werden. Enthält eine solche Liste weniger Elemente als das Array, werden die restlichen Elemente mit dem Standardwert des Datentyps initialisiert.

Beispiele: Durch die folgenden Initialisierungen erhält das Array die jeweils als Kommentar angegebenen Werte:

```

const int m = 2, n = 3;
int a[m][n] = { {1,2,3},{4,5,6} };
// a[0][0]=1 a[0][1]=2 a[0][2]=3
// a[1][0]=4 a[1][1]=5 a[1][2]=6

int b[m][n] = { {1},{4} };
// b[0][0]=1 b[0][1]=0 b[0][2]=0
// b[1][0]=4 b[1][1]=0 b[1][2]=0

```

#### Aufgaben 4.4

1. Geben Sie Anweisungsfolgen an, mit denen man in einem Array die Position der folgenden Elemente findet. Falls es mehrere solche Elemente gibt, soll die Position des zuerst gefundenen bestimmt werden:
  - a) in einem zweidimensionalen Array „int a[m][n]“ das kleinste Element,
  - b) in einem dreidimensionalen Array „int a[m][n][p]“ das kleinste Element.

Testen Sie diese Anweisungsfolgen mit verschiedenen Arrays, die bei ihrer Definition initialisiert werden.

### 4.5 Dynamische Programmierung $\Theta$

Wenn man Arrays zur Speicherung von Teilergebnissen verwendet, spricht man gelegentlich auch von **dynamischer Programmierung** (obwohl dieser Begriff auch noch andere Bedeutungen hat). Diese Technik kann eine effiziente Alternative zu rekursiven Funktionen (siehe Abschnitt 2.4.11) sein.

Beispiel: Die iterative Lösung zur Berechnung der **Fibonacci-Zahlen** 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8 usw. (siehe Aufgabe 2.4.4, 3.)

$$f_0 = 0, f_1 = 1, f_i = f_{i-1} + f_{i-2} \text{ für } i = 2, 3, 4, \dots$$

ist relativ schnell, wird aber oft als etwas schwierig empfunden. Die rekursive Lösung (siehe Aufgabe 2.4.11, 1.b) ist dagegen einfacher, aber auch sehr ineffizient. Speichert man die zuvor berechneten Werte in einem Array, erhält man eine Lösung, die so einfach ist wie rekursive und fast so schnell wie die iterative:

```

int Fibonacci(int n)
{
    const int max = 50;
    int f[max] = { 0,1 };
    for (int i = 2; i<max; i++)
        f[i] = f[i - 1] + f[i - 2];
    if (0 <= n && n<max)
        return f[n];
    else return -1;
}

```

Mit *constexpr*-Funktionen, die ein *constexpr*-Array zurückgeben, ist diese Vorgehensweise noch effektiver (siehe Abschnitt 2.7.3).

### Aufgabe 4.5

Das sogenannte **Pascal-Dreieck** (nach dem Mathematiker Blaise Pascal) entsteht dadurch, dass man zunächst die Zahl 1 in eine Zeile schreibt. Die nächste Zeile entsteht dann aus der vorhergehenden, indem man die Summe der darüber stehenden bildet, wobei man sich links von der ersten und rechts von der letzten eine Null denkt.

```

      1
     1 1
    1 2 1
   1 3 3 1
  1 4 6 4 1
 1 5 10 10 5 1
  .....
```

Die Zahlen des Pascal-Dreiecks sind die Binomialkoeffizienten. Schreiben Sie eine Funktion *binom*, die für die Argumente *n* und *k* den *k*-ten Wert aus der *n*-ten Zeile des Pascal-Dreiecks zurückgibt. Dabei werden *n* und *k* jeweils ab 0 gezählt, d.h.  $\text{binom}(3,1)=3$ .

## 5 Einfache selbstdefinierte Datentypen

Selbstdefinierte Datentypen werden normalerweise mit Klassen definiert. Das ist allerdings ein umfangreiches Thema (siehe Kapitel 8). Damit auch schon vor Kapitel 8 einfache selbstdefinierte Datentypen verwendet werden können, werden hier einige einfache Grundbegriffe im Zusammenhang mit sogenannten **Strukturen** und Aufzählungstypen betrachtet.

### 5.1 Mit *struct* definierte Klassen

Oft ist es sinnvoll, zusammengehörige Daten in einem eigenen Datentyp zusammenzufassen. Das ist mit Klassen möglich, die in Kapitel 8 zusammen mit der objektorientierten Programmierung noch ausführlich behandelt werden.

Eine Klasse ist ein Datentyp, der Elemente enthalten kann. Diese werden in der Syntaxregel als *member-specification* angegeben:

```
class-specifier:
    class-head { member-specification opt }

class-head:
    class-key identifier opt base-clause opt
    class-key nested-name-specifier identifier base-clause opt

class-key:
    class
    struct
    union
```

Als Elemente werden vorläufig nur Elemente verwendet, die wie Variablen definiert werden. Solche Elemente werden auch als **Datenelemente** bezeichnet. Außerdem werden hier zunächst nur Klassen verwendet, die mit *struct* definiert werden. Solche Klassen werden auch als **Struktur** bezeichnet.

Beispiel: Der umgangssprachliche Begriff „Kalenderdatum“ steht für drei Werte, die einen Tag, einen Monat und ein Jahr bezeichnen. Ein solches Datum kann durch die Klasse *CDatum* mit den Datenelementen *Tag*, *Monat* und *Jahr* dargestellt werden:

```
struct Datum {
```

```
int Tag;
int Monat;
int Jahr;
}; // Das Semikolon ist hier notwendig.
```

Eine Struktur kann man wie einen vordefinierten Datentyp zur Definition von Variablen, Parametern, Rückgabetypen von Funktionen, Arrays usw. verwenden.

Eine Variable, deren Datentyp eine Klasse ist, enthält alle Elemente, die bei der Definition der Klasse angegeben wurden. Diese Elemente werden durch den Namen der Variablen angesprochen, auf den ein Punkt und der Name des Elements folgt. Jeder so gebildete Ausdruck ist ein Ausdruck des Datentyps, der bei der Definition des Elements angegeben wurde.

Beispiel: Mit diesem Datentyp kann man wie mit einem der vordefinierten Datentypen *int* usw. eine Variable des Datentyps *Datum* definieren:

```
Datum d;
```

Die Elemente der Variablen *d* kann man folgendermaßen ansprechen:

```
d.Tag = 17;
d.Monat = 3;
d.Jahr = 2019;
```

Jedes Element ist eine Variable des Datentyps *int* und kann wie eine *int*-Variable *i* verwendet werden. Seit C++11 kann man eine Struktur auch mit einer Initialisierungsliste initialisieren

```
Datum d{ 17, 3, 2020 };
```

oder einen Wert zuweisen:

```
d = { 17, 3, 2020 };
```

Seit Visual Studio 2019 kann man bei einem einfachen *struct* in einer Initialisierungsliste auch die Namen der Elemente angeben:

```
Datum d { .Tag = 17, .Jahr = 2020 }; // d.Monat=0
```

Eine Zusammenfassung inhaltlich zusammengehöriger Daten zu einer Klasse kann zur **Übersichtlichkeit** eines Programms beitragen.

Beispiel: Die **Zusammengehörigkeit** und Bedeutung der Daten kommt in

```
Datum d1, d2;
```

unmittelbar zum Ausdruck. Eine Alternative ohne Klassen wäre

```
int t1, t2, m1, m2, j1, j2;
```



Hier ist ohne zusätzliche Kommentare kaum ersichtlich, dass {t1, m1, j1} und {t2, m2, j2} jeweils ein Kalenderdatum darstellen sollen.

Ein **Array** mit Elementen des Typs *Datum*

```
std::array<Datum, 100> d; // bzw. Datum d[100];
```

ist übersichtlicher als drei Arrays für die Tage, Monate und die Jahre:

```
std::array<int, 100> Tage, Monate, Jahre; //bzw. int Tage[100]
```

Mit einer Struktur als Rückgabetyt einer Funktion kann man mehrere Werte aus einer Funktion zurückgeben.

Beispiel: Ohne Klassen kann man nicht mehr als einen Wert aus einer Funktion zurückgeben.

```
Datum Weihnachten(int Jahr)
{
    Datum d = { 25,12,Jahr };
    // oder Datum d; d.Tag = 25; d.Monat = 12; d.Jahr = Jahr;
    return d;
}
```

Typische Anwendungen von Strukturen findet man auch in der betriebswirtschaftlichen Datenverarbeitung. Dabei werden oft die einzelnen Zeilen einer Tabelle durch eine Struktur dargestellt, die auch als Datensatz bezeichnet wird. Aus solchen Strukturen werden dann Arrays oder Dateien aufgebaut. Datenbanken sind im Wesentlichen eine mehr oder weniger große Anzahl von Dateien, die alle aus solchen Datensätzen bestehen.

Beispiel: Eine Zeile der Tabelle

| Konto-<br>nummer | Konto-<br>inhaber | Buchungsdatum<br>TT.MM.JJJJ |    |      | Bew.-<br>art | Betrag  |
|------------------|-------------------|-----------------------------|----|------|--------------|---------|
| 1019             | Q. König          | 13                          | 12 | 2019 | -            | 1234.56 |
|                  |                   | 13                          | 12 | 2019 | -            | 789.01  |
|                  |                   | 14                          | 12 | 2019 | +            | 23.45   |

kann für eine **Kontobewegung** stehen und durch die folgende Struktur dargestellt werden:

```
struct Kontobewegung {
    int KontoNr;
    string NameInhaber;
    // ...
    double Betrag;
};
```

Dieser Datensatz enthält mit dem Datum einen weiteren Datensatz. Will man dieses Datum unter einem eigenständigen Begriff ansprechen, kann man es innerhalb der Struktur ebenfalls als Struktur definieren:

```
struct Kontobewegung {
    int KontoNr;
    string NameInhaber;
    struct {
        int Tag;
        int Monat;
        int Jahr;
    } Buchungsdatum;
    char BewArt;
    double Betrag;
};
```

Die Verschachtelung von Strukturen kann im Prinzip unbegrenzt fortgesetzt werden. Wenn zuvor wie auf Seite 267 ein Name für die Struktur vereinbart wurde, kann dieser verwendet werden:

```
struct Kontobewegung {
    int KontoNr;
    string NameInhaber;
    Datum Buchungsdatum;
    char BewArt;
    double Betrag;
};
```

Elemente einer verschachtelten Struktur werden durch eine verschachtelte Punktnotation angesprochen.

Beispiel: Nach der Definition

```
Kontobewegung k;
```

ist

```
k.Buchungsdatum
```

eine Variable des Typs *Datum*. Die drei Elemente von *k.Datum* lassen sich einzeln ansprechen durch

```
k.Buchungsdatum.Tag = 8;
k.Buchungsdatum.Monat = 9;
k.Buchungsdatum.Jahr = 2017;
```

Obwohl man Variablen desselben Klassentyps einander wie in

```
k1 = k2;
```

zuweisen kann, ist ein **Vergleich von zwei solchen Variablen** mit einem der Operatoren <, <=, == usw. **nicht möglich**. Der Compiler weigert sich, den booleschen Ausdruck in

```
if (k1 == k2) // error: Operator '==' nicht definiert
```

zu übersetzen, wenn für den Datentyp von k1 und k2 der Operator „==“ nicht definiert ist. Für Operatoren wie < oder <= ist das unmittelbar einsichtig: Ein byteweiser Vergleich der Operanden würde nur in den wenigsten Fällen das gewünschte Ergebnis erzielen, insbesondere wenn Strings enthalten sind. Aber auch eine Prüfung auf Gleichheit oder Ungleichheit ist nicht möglich, da diese Operatoren nur für Operanden vordefiniert sind, deren Datentyp ein arithmetischer Datentyp, ein Aufzählungstyp oder ein Zeigertyp ist.

Eine Variable eines Klassentyps, der wie die bisherigen Strukturen nur Datenelemente enthält, kann bei ihrer Definition mit einer **Initialisierungsliste** (siehe Abschnitt 2.3.4) initialisiert werden. Falls diese Liste weniger Ausdrücke enthält als die Struktur Elemente, werden die übrigen Elemente mit 0 (Null) initialisiert. Ohne eine solche Liste werden die Elemente globaler Variablen mit 0 initialisiert, während die Elemente lokaler Variablen undefiniert bleiben.

Beispiel: 

```
Datum d1={25,12,2017 };// d1.Tag=25, d1.Monat=12, d1.Jahr=2017
Datum d2 = {}; // d1.Tag=0, d1.Monat=0, d1.Jahr=0
Datum d3; // lokal undefiniert, global wie d2
```

Wenn eine Struktur verschachtelte Strukturen enthält, kann für jede Struktur eine eigene durch geschweifte Klammern begrenzte Liste angegeben werden. Falls eine dieser Listen weniger Werte hat als die jeweilige Struktur Elemente, erfolgt die Zuordnung im Rahmen der Unterstruktur. Eine verschachtelte Struktur kann aber auch mit einer nicht verschachtelten Liste von Ausdrücken initialisiert werden.

Beispiel: 

```
struct T {
    Datum d; // wie oben
    int x, y, r;
};

T a = { { 1, 2 }, 3 };// a.d.Tag=1, a.d.Monat=2, a.x=3
T b = { 1, 2, 3 }; // b.d.Tag=1, b.d.Monat=2, b.d.Jahr=3
```

Im **Debugger** werden die Elemente einer Variablen eines Klassentyps unter *Debuggen|Fenster* in den Fenstern *Überwachen*, *Auto* und *Lokal* wie bei einem Initialisierungsausdruck mit geschweiften Klammern zusammengefasst:

| Lokal                                        |                                                           |                            |  |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------|--|
| Name                                         | Wert                                                      | Typ                        |  |
| ▲ k                                          | { KontoNr=1017 NameInhaber={...} Buchungsdatum={...} ...} | Kontobewegung              |  |
| Betrag                                       | 123.00000000000000                                        | double                     |  |
| BewArt                                       | 43 '+'                                                    | char                       |  |
| ▲ Buchungsdatum { Tag=12 Monat=3 Jahr=2015 } |                                                           | Datum                      |  |
| Jahr                                         | 2015                                                      | int                        |  |
| Monat                                        | 3                                                         | int                        |  |
| Tag                                          | 12                                                        | int                        |  |
| KontoNr                                      | 1017                                                      | int                        |  |
| ▶ NameInhaber { ... }                        |                                                           | std::basic_string<char,std |  |

### Aufgabe 5.1

Ein Datensatz zur Darstellung eines Girokontos soll die Elemente

Adresse, Kontonummer, Kontostand und Kreditlimit

enthalten. Die Adresse soll aus den Elementen

Anrede, Vorname, Nachname, Postleitzahl, Ort, Straße, Hausnummer, Ausland, Vorwahl und Telefonnummer

bestehen. Innerhalb der Adresse sollen zusammengefasst werden:

Vor- und Nachname zu Name,  
 PLZ bis Hausnummer zu Anschrift und  
 Vorwahl und Telefonnummer zu Telefon.

Entwerfen Sie ein *struct*, das einen solchen Datensatz darstellt. Geben Sie an, wie die Elemente *Kontonummer*, *Vorname* und *Vorwahl* einer Variablen *g* dieses Datentyps angesprochen werden können.

## 5.2 Aufzählungstypen

Ein Aufzählungstyp (engl. „enumeration type“) ist ein selbst definierter Datentyp, der Werte darstellen kann, die bei seiner Definition als Liste von Bezeichnern angegeben werden. Ein Aufzählungstyp ist meist dann sinnvoll, wenn für eine Variable nur eine relativ geringe Anzahl verschiedener Werte möglich ist und die Namen dieser Werte ihre Bedeutung darstellen sollen.

Jeder Aufzählungstyp ist ein eigener Datentyp, der von allen anderen Datentypen verschieden ist. Aufzählungstypen werden zusammen mit den arithmetischen Datentypen und den Zeigertypen als **skalare Datentypen** bezeichnet.



Damit alle Enumeratoren eindeutig sind, wählt man für sie meist Namen, die den Aufzählungstyp enthalten (oft abgekürzt, z.B. als Präfix).

Beispiel: Mit diesen Präfixen sind die Enumeratoren eindeutig:

```
enum Wochentag { wtMontag, wtDienstag, wtSonntag };
enum Wochenende { weSamstag, weSonntag };
```

Für Aufzählungstypen gibt es keine vordefinierten Funktionen, mit denen sie in einen String konvertiert werden können (oder umgekehrt).

Beispiel: Eine Zuweisung der Art

```
Tag = "Sonntag"; //error: Konvertierung nicht möglich
```

ist nicht möglich. Will man Werte eines Aufzählungstyps aufgrund von Benutzereingaben setzen, müssen sie explizit umgesetzt werden wie in

```
if (Text == "Sonntag") Tag = Sonntag;
```

### 5.2.2 enum Konstanten und Konversionen 0

Obwohl der Datentyp eines Enumerators der zugehörige Aufzählungstyp ist, kann er wie eine Ganzzahlkonstante verwendet werden. Ohne eine explizite Initialisierung hat der erste Enumerator in der Liste den Wert 0, und jeder weitere einen um 1 höheren Wert als der Vorgänger.

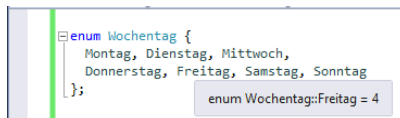
Beispiel: Die Werte der Enumeratoren von

```
enum Wochentag { Montag, Dienstag, Mittwoch,
                Donnerstag, Freitag, Samstag, Sonntag};
```

entsprechen den Werten der folgenden Konstanten:

```
const int Montag = 0;
const int Dienstag = 1; // usw.
```

Diese Werte werden auch von Intellisense angezeigt, wenn man mit dem Mauszeiger über einen Wert fährt:



Ein Enumerator kann bei seiner Definition mit einem ganzzahligen Wert initialisiert werden. So erhalten die Enumeratoren *Montag*, *Dienstag* usw. durch

```
enum WT { Montag, Dienstag = 17, Mittwoch = 17, Donnerstag,
        Freitag = -2, Samstag, Sonntag = (Dienstag-7)*Mittwoch};
```

die Werte 0 (Montag), 17 (Dienstag), 17, 18, -2, -1 und 170. Diese Werte zeigen, dass gleiche und negative Werte möglich sind.

Beispiel: In C werden solche Enumeratoren oft für Arraygrenzen verwendet. In C++ besteht dafür aber keine Notwendigkeit:

```
enum { Max = 100 }; // besser: "const int Max=100"
int a[Max];
```

Aufzählungstypen sind nicht typischer: Ein Wert eines Aufzählungstyps wird durch eine ganzzahlige Typangleichung (siehe Abschnitt 2.3.3) in den Datentyp *int* konvertiert. Das ermöglicht Fehler, die der Compiler bei einem selbstdefinierten Datentyp eigentlich erkennen sollte.

Beispiel: Mit den Aufzählungstypen von oben sind diese Ausdrücke zulässig:

```
enum Biersorte { Pils, Export, Kölsch };
int i = Montag;    // i=0
if (Tag > 0) ...    // Vergleich von enum mit int
if (Tag > Pils)..   // Vergleich von verschiedenen
                  // Aufzählungstypen
```

Eine Konversion in der umgekehrten Richtung ist nicht möglich. Einer Variablen eines Aufzählungstyps können nur Werte desselben Aufzählungstyps zugewiesen werden. Insbesondere können keine Ganzzahlwerte zugewiesen werden, obwohl ein Enumerator damit initialisiert werden kann.

Beispiel: Nach den Definitionen von oben werden die folgenden Zuweisungen nicht kompiliert:

```
Tag = 1;    // error: Konvertierung nicht möglich
Tag = Pils; // error: Konvertierung nicht möglich
```

### 5.2.3 Stark typisierte Aufzählungstypen (C++11)

C++11 wurde um Aufzählungstypen erweitert, die nicht mehr implizit in einen Ganzzahldatentyp konvertiert werden. Die Definition eines solchen Aufzählungstyps unterscheidet sich nur durch das Wort *class* noch *enum*:

Beispiel: Durch die Angabe von *class* nach *enum* erhält man einen stark typisierten Aufzählungstyp:

```
enum class Wochentag { Sonntag, Montag, Dienstag };
enum class Wochenende { Samstag, Sonntag };
```

Die wichtigsten Unterschiede zu schwach typisierten Aufzählungstypen:

- Für stark typisierte Aufzählungstypen ist **keine implizite Konversion** in einen ganzzahligen Datentyp definiert. Deswegen wird der folgende Vergleich vom Compiler nicht akzeptiert:

```
Wochentag t = Wochentag::Sonntag;
if (t > 0) // error: operator '>': Alle Operanden müssen
           //      den gleichen Enumerationstyp aufweisen
```

- Der **Gültigkeitsbereich** von solchen Enumeratoren ist auf ihren Aufzählungstyp beschränkt. Die Enumeratoren werden dann mit dem Namen des Aufzählungstyps und dem Bereichsoperator `::` angesprochen: So können verschiedene Aufzählungstypen dieselben Enumeratoren verwenden:

```
Wochentag t = Wochentag::Sonntag;
Wochenende w = Wochenende::Sonntag;
```

- Stark typisierte Aufzählungstypen können nur global definiert werden. Lokale Definitionen in einer Funktion sind nicht möglich.
- Der Datentyp der Enumeratoren kann nach einem Doppelpunkt angegeben werden. Nach

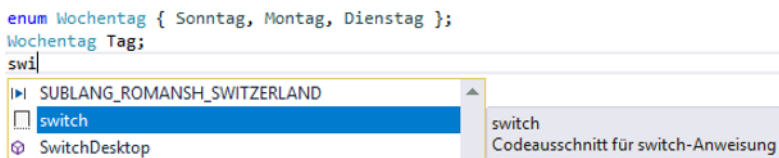
```
enum class Wochentag :char { Sonntag, Montag, Dienstag };
```

haben die Enumeratoren den Datentyp *char*. Ohne die Angabe eines solchen Datentyps haben die Enumeratoren den Datentyp *int*. Für die Angabe eines solchen Datentyps besteht aber nur selten eine Notwendigkeit.

Bei einer Codeanalyse mit den C++ Core Guidelines (siehe Abschnitt 2.13) wird empfohlen, *enum class* zu verwenden:

```
enum Wochentag {Sonntag, Montag, Dienstag}; // warning C26812 : Geben
                                              Sie "enum class" Vorrang vor "enum" (Enum.3).
```

Die verschiedenen Werte eines Aufzählungstyps werden oft in einer *switch*-Anweisung (siehe Abschnitt 2.4.12) bearbeitet. **Intellisense** unterstützt das durch einen Code-Ausschnitt, der für alle Werte eines Aufzählungstyps eine *case*-Marke erzeugt. Tippt man dann die ersten Buchstaben von „switch“ ein und wählt den Code-Ausschnitt aus (mit der Tab-Taste)



```
enum Wochentag { Sonntag, Montag, Dienstag };
```

```
Wochentag Tag;
```

```
swi|
```

The screenshot shows a code completion menu with the following items:

- SUBLANG\_ROMANSH\_SWITZERLAND
- switch (highlighted)
- SwitchDesktop

On the right side of the menu, there is a tooltip that reads: "switch Codeausschnitt für switch-Anweisung".

erhält man

```
Wochentag Tag;
switch (switch_on)
{
default:
    break;
}
```



Tippt man dann für „switch on“ den Namen einer Variablen eines Aufzählungstyps (das kann auch ein schwach typisierter Aufzählungstyp sein) ein und drückt dann die Return-Taste, erzeugt Intellisense für jeden Wert des Aufzählungstyps eine *case*-Marke.

```
switch (Tag)
{
    case Wochentag::Sonntag:
        break;
    case Wochentag::Montag:
        break;
    case Wochentag::Dienstag:
        break;
    default:
        break;
}
```

Seit Visual Studio 2019 kann man in *switch* eine *using enum* Anweisung mit dem Namen des Aufzählungstyps angeben und diesen dann bei den *case*-Marken weglassen:

```
switch (Tag)
{
    using enum Wochentag;
    case Sonntag:
        break;
    case Montag:
        break;
    ...
}
```

## 6 Zeiger, dynamisch erzeugte Variablen und smart pointer

In den bisherigen Ausführungen wurden Speicherbereiche im Hauptspeicher immer über Variablen und ihre Namen angesprochen. Durch eine Definition wie

```
int x;
```

ordnet der Compiler der Variablen *x* einen Speicherbereich zu (4 Bytes bei 32-bit *int*-Werten). Dieser Bereich wird unter dem Namen *x* als *int*-Wert angesprochen.

Es ist aber auch möglich, Speicherbereiche über ihre **Adresse** im Hauptspeicher anzusprechen. Dann bezeichnet man diese Adresse auch als **Zeiger** und sagt, dass der Zeiger auf den Speicherbereich bzw. die Variable zeigt. Ein Zeiger ist also eine Zahl, die eine Adresse im Hauptspeicher bezeichnet. Im Unterschied zu älteren Versionen von C ist ein Zeiger in C++ aber nicht nur eine Zahl, sondern hat auch einen Datentyp. Dieser wird bei der Definition des Zeigers angegeben. Über diesen Datentyp ergibt sich dann, wie viele Bytes ab der Adresse angesprochen werden, und wie dieser Speicherbereich interpretiert wird.

Anstelle des Begriffs „Zeiger“ wird auch oft der Begriff **Pointer** verwendet.

Beispiel: Im Hauptspeicher sollen die folgenden Werte stehen:

| Adresse | Wert      |
|---------|-----------|
| ...     |           |
| 1007    | 0000 0011 |
| 1006    | 0000 0101 |
| 1005    | 0000 0001 |
| 1004    | 0100 0001 |
| ...     |           |
| 3       | 1100 1101 |
| 2       | 0100 1101 |
| 1       | 0101 1101 |
| 0       | 0111 1001 |

Wenn ein Zeiger mit dem Wert 1004 (der Adresse) auf einen *int*-Wert zeigt, dann zeigt dieser Zeiger auf den Speicherbereich an den Adressen 1004 bis 1007 mit dem Wert  $3 \cdot 256^3 + 5 \cdot 256^2 + 1 \cdot 256^1 + 65 \cdot 256^0 = 50659649$ . Zeigt die Adresse 1004 dagegen auf einen *char*-Wert, zeigt sie auf den Wert 'A', da die Zahl 65 im ASCII-Zeichensatz das Zeichen 'A' darstellt.

Viele Programmierer (nicht nur Anfänger) finden den Umgang mit Zeigern schwierig. Falls Ihnen beim ersten Durchlesen nicht alle Zusammenhänge klar werden, lassen Sie sich nicht entmutigen. Lesen Sie einfach erst einmal einige Seiten weiter und versuchen Sie, einige Aufgaben zu lösen. Wiederholen Sie dann die noch unklaren Teile.

Die Arbeit mit Zeigern ist generell fehleranfällig und sollte vermieden werden, wo immer das möglich ist. C++ hat zahlreiche Sprachelemente, die in älteren Programmiersprachen wie C auf Zeigern beruhen, durch neue Konzepte ohne Zeiger ergänzt. Einige Beispiele:

- Stringklassen anstelle von nullterminierten Strings
- Referenzparameter anstelle von Zeiger-Parametern
- Containerklassen anstelle von verketteten Listen, dynamischen Arrays usw.
- Smart pointer anstelle von Zeigern (siehe Kapitel 18)

Deshalb werden Zeiger in C++ viel seltener benötigt als in C und können oft sogar ganz vermieden werden. Falls man aber Bibliotheken benötigt, die Zeiger verwenden, kommt man doch nicht ohne sie aus. Außerdem sind viele Sprachkonzepte intern mit Zeigern implementiert und können nur vor diesem Hintergrund richtig verstanden werden.

## 6.1 Die Definition von Zeigervariablen

Eine **Zeigervariable** ist eine Variable, die einen Zeiger darstellt. Anstelle dieses Begriffs sind auch die Begriffe „Zeiger“, „Pointer“ oder „Pointer-Variable“ verbreitet. Eine Zeigervariable wird dadurch definiert, dass man nach dem Datentyp *T* einen *\** angibt:

*T*\* *p*

Der **Datentyp** von *p* ist dann „Zeiger auf *T*“ und wird auch mit „*T*\*“ abgekürzt.

Beispiel: Durch

```
int * pi;
double* pd;
char* pc;
```

werden die Zeigervariablen *pi*, *pd* und *pc* definiert. Sie haben die Datentypen „Zeiger auf *int*“, „Zeiger auf *double*“ und „Zeiger auf *char*“ bzw. kürzer *int*\*, *double*\* und *char*\*.

Ein Zeiger stellt eine **Hauptspeicheradresse** dar. Wenn der Zeiger *p* den Datentyp „Zeiger auf *T*“ hat, spricht man mit *\*p* die *sizeof(T)* Bytes ab der Adresse in *p* als Ausdruck des Datentyps *T* an. Der Operator *\** wird auch als **Dereferenzierungsoperator** bezeichnet.

Beispiel: Nach den Definitionen aus dem letzten Beispiel werden die 4 ( $=\text{sizeof}(\text{int})$ ) Bytes ab der Adresse in *pi* mit *\*pi* als Variable des Datentyps *int* angesprochen. Durch

```
*pi = 17;
```

werden diese 4 Bytes mit dem Wert 17 überschrieben.

Falls der Datentyp T eine Klasse (siehe Kapitel 5 und 8) ist,

```
Datum* pd = new Datum;
```

kann man ein Element der Klasse sowohl über den dereferenzierten Zeiger

```
(*pd).Tag = 17;
```

als auch über den Pfeiloperator ->

```
pd->Tag = 17;
```

ansprechen. Der Ausdruck  $e1 \rightarrow e2$  wird vom Compiler in  $(*(e1)).e2$  umgewandelt.

Ein Zeiger auf die dereferenzierte Variable wird oft durch einen Pfeil dargestellt:

$p \longrightarrow *p$

Mit der Definition einer Zeigervariablen *p* wird nur der Speicher für die Zeigervariable selbst reserviert, nicht jedoch der für die Variable *\*p*, auf die er zeigt. Eine Zeigervariable belegt bei einem 32-bit-Betriebssystem immer 4 Bytes.

Eine global definierte Zeigervariable *p* wird wie jede andere globale Variable mit 0 initialisiert, und eine lokal definierte Zeigervariable hat wie jede andere lokale Variable einen unbestimmten Wert. Deshalb stellt *\*p* den Speicherbereich an der Adresse 0 bzw. an einer undefinierten Adresse dar, wenn *p* keine Adresse zugewiesen wird.

Beispiel: Vergisst man nach der Definition einer Zeigervariablen *p*, dieser die Adresse eines reservierten Speicherbereichs zuzuweisen, wird durch *\*p* meist ein nicht reservierter Speicherbereich angesprochen:

```
int* pi;  
*pi = 17;
```

Mit etwas Glück führt die Zuweisung dann zu einer Zugriffsverletzung, die vom Betriebssystem erkannt wird und zu einem Programmabsturz führt. Mit etwas weniger Glück erhält man keine Fehlermeldung und überschreibt Daten, was in ganz anderen Teilen des Programms unerwartete Folgen haben kann. Die Ursache für solche Fehler ist oft nur schwer zu finden.

Damit unterscheidet sich eine Variable, die über einen Zeiger angesprochen wird, folgendermaßen von einer „gewöhnlichen“ Variablen, die durch eine Definition erzeugt wurde:

1. Der Compiler reserviert den Speicher für eine „gewöhnliche“ Variable wie

```
int i;
```

automatisch mit ihrer Definition. Dieser Speicherbereich wird automatisch durch den Namen der Variablen angesprochen und ist untrennbar mit diesem Namen verbunden. Es ist nicht möglich, bei der Verwendung solcher Variablen eine Zugriffsverletzung zu bekommen, da sie nie Speicherbereiche ansprechen, die nicht reserviert sind.

2. Mit der Definition eines Zeigers `p` reserviert der Compiler keinen Speicherbereich für die Variable `*p`. Ein solcher Speicherbereich muss explizit zugewiesen werden (siehe Abschnitte 6.2 und 6.5). Da die Definition einer Zeigervariablen unabhängig von einer solche Zuordnung ist, kann man mit `*p` nicht reservierte Speicherbereiche ansprechen, was einen Programmabbruch zur Folge haben kann.  
Die Adresse dieses Speicherbereichs ist nicht wie unter 1. fest mit dem Namen der Variablen verbunden, sondern der Wert der Variablen `p`. Nach einer Änderung dieser Adresse stellt `*p` einen anderen Speicherbereich als vorher dar.

Im Umgang mit Zeigern ist deshalb mehr Vorsicht geboten als mit „gewöhnlichen“ Variablen.

Bei der Definition einer Zeigervariablen muss das Zeichen `*` nicht unmittelbar auf den Datentyp folgen. Die folgenden vier Definitionen sind gleichwertig:

```
int* i; // Whitespace (z.B. ein Leerzeichen) nach *
int *i; // Whitespace vor *
int * i; // Whitespace vor * und nach *
int*i;  // Kein whitespace vor * und nach *
```

Versuchen wir nun, diese vier Definitionen nach demselben Schema wie eine Definition von „gewöhnlichen“ Variablen zu interpretieren. Bei einer solchen Definition bedeutet

```
T v;
```

dass eine Variable `v` definiert wird, die den Datentyp `T` hat. Für die vier gleichwertigen Definitionen ergeben sich verschiedene Interpretationen, die als Kommentar angegeben sind:

```
int* i; // Definition der Variablen i des Datentyps int*
int *i; // Irreführend: Es wird kein "*i" definiert,
        // obwohl die dereferenzierte Variable *i heißt.
int * i; // Datentyp int oder int* oder was?
int*i;  // Datentyp int oder int* oder was?
```

Offensichtlich passen nur die ersten beiden in dieses Schema. Die erste führt dabei zu einer richtigen und die zweite zu einer falschen Interpretation.

Allerdings passt die erste Schreibweise nur bei der Definitionen einer einzelnen Zeigervariablen in dieses Schema, da sich der `*` bei einer Definition nur auf die Variable unmittelbar rechts vom `*` bezieht:

```
int* i, j, k; // definiert int* i, int j, int k
              // und nicht: int* j, int* k
```

Zur Vermeidung solcher Missverständnisse sind zwei Schreibweisen verbreitet:

- C-Programmierer verwenden oft die zweite Schreibweise von oben, obwohl sie nicht in das Schema der Definition von „gewöhnlichen“ Variablen passt.

```
int *i, *j, *k; // definiert int* i, int* j, int* k
```

- Stroustrup (1997, Abschnitt 4.9.2) empfiehlt, auf Mehrfachdefinitionen zu verzichten. Er schreibt den `*` wie in „`int* pi`“ immer unmittelbar nach dem Datentyp. Diese Schreibweise wird auch im Folgenden verwendet.

## 6.2 Der Adressoperator, Zuweisungen und generische Zeiger

Bei allen bisherigen Beispielen wurde einer Zeigervariablen `p` nie die Adresse einer Variablen zugewiesen. Das ist aber notwendig, wenn man mit der Variablen `*p` arbeiten will. Variablen können folgendermaßen erzeugt werden:

1. Durch eine Variablendefinition erzeugt der **Compiler** eine Variable.
2. Durch den Aufruf von Funktionen wie `new` können Variable **während der Laufzeit** eines Programms erzeugt werden.

In diesem Abschnitt wird die erste dieser beiden Möglichkeiten betrachtet. Die zweite folgt dann in Abschnitt 6.5.

Mit dem Referenzierungs- oder **Adressoperator** `&` vor dem Namen einer Variablen erhält man ihre Adresse. Wenn die Variable `v` den Datentyp `T` hat, hat `&v` den Datentyp „Zeiger auf `T`“.

Beispiel: Durch die Definitionen

```
int i = 17; double d = 18; char c = 'A';
```

wird Speicherplatz für die Variablen `i`, `d` und `c` reserviert. Die Adressen dieser Variablen haben den als Kommentar angegebenen Datentyp:

```
&i // Zeiger auf int
&d // Zeiger auf double
&c // Zeiger auf char
```

Einer Zeigervariablen kann durch eine **Zuweisung** oder **Initialisierung** ein Zeiger desselben Datentyps zugewiesen werden. Dabei wird die Adresse übertragen. Auf die zugehörige dereferenzierte Variable wirkt sich eine Zuweisung der Zeiger nicht aus.

Beispiel: Die Adressen der Variablen

```
int i = 17; double d = 18; char c = 'A';
```

werden den Zeigern *pi*, *pd* und *pc* zugewiesen:

```
int* pi; double* pd;
pi = &i; // pi wird die Adresse von i zugewiesen
pd = &d; // pd wird die Adresse von d zugewiesen
char* pc = &c; // initialisiere pc mit &c
```

Weist man einer Zeigervariablen *p* wie in diesem Beispiel die Adresse einer Variablen *v* zu, kann der Speicherbereich von *v* sowohl unter dem Namen *v* als auch unter dem Namen *\*p* angesprochen werden. Ändert man den Wert einer der beiden Variablen, wird damit automatisch auch der Wert der anderen Variablen verändert, ohne dass das durch eine explizite Anweisung aus dem Quelltext hervorgeht. Dieser Effekt wird als **Aliasing** bezeichnet.

Beispiel: Nach den Zuweisungen des letzten Beispiels stellen *\*pi* und *i* denselben Speicherbereich mit dem Wert 17 dar. Durch die nächsten Zuweisungen wird sowohl der Wert von *\*pi* als auch der von *i* verändert, obwohl keine explizite Zuweisung an *i* stattfindet.

```
*pi = 18;    // i = 18;
*pi = (*pi) + 1; // i = 19;
```

Es ist nur selten sinnvoll, denselben Speicherbereich unter zwei verschiedenen Namen anzusprechen: Meist ist es recht verwirrend, wenn sich der Wert einer Variablen verändert, ohne dass ihr explizit ein neuer Wert zugewiesen wurde. Wenn das in diesem Abschnitt trotzdem gemacht wird, dann nur um zu zeigen, dass Zuweisungen, die ja für „gewöhnliche“ Variable in gewisser Weise die **einfachsten Anweisungen** sind, bei Zeigern nicht ganz so einfach sein müssen.

Das soll aber nicht heißen, dass Aliasing immer schlecht ist. Wenn eine Funktion einen Parameter eines Zeigertyps hat, kann man über diesen Zeiger die Speicherbereiche ansprechen, deren Adresse als Argument übergeben wird. Ein solches Aliasing ist normalerweise nicht verwirrend. In C, wo es keine Referenzparameter gibt, werden solche Parameter oft verwendet.

Beispiel: Wenn die Funktion

```
void f(int* p) { *p = 17; }
```

wie in den nächsten Anweisungen aufgerufen wird, erhält *i* den Wert 17:

```
int i = 18;
f(&i);
```

In C++ kann einer Zeigervariablen nur ein Zeiger desselben Datentyps zugewiesen werden, falls man nicht eine explizite Konversion (siehe 2. unten) verwendet.

Beispiel: Nach den Definitionen der letzten Beispiele verweigert der Compiler die Zuweisung

```
pd = pi; // error: 'int *' kann nicht in 'double *'
        //          konvertiert werden
```

Wäre diese Zuweisung möglich, wäre *\*pd* die 8 Bytes breite *double*-Variable ab der Adresse in *pi*. Falls *pi* auf eine *int*-Variable *i* zeigt, würde das Bitmuster von *i* (Binärdarstellung) als das einer Gleitkommazahl (Mantisse usw.) interpretiert und würde einen sinnlosen Wert darstellen.

Falls ab der Adresse in *pi* nur 4 Bytes für eine *int*-Variable reserviert sind, kann der Zugriff auf *\*pd* zu einer Zugriffsverletzung und zu einem Programmabsturz führen.

Da alle Zeiger eine Hauptspeicheradresse enthalten und deshalb gleich viele Bytes belegen, wäre es rein technisch kein Problem, einer Zeigervariablen *pd* des Datentyps *double\** einen Zeiger *pi* des Datentyps *int\** zuzuweisen. In C ist das auch möglich. Wie das letzte Beispiel aber zeigt, ist eine solche Zuweisung meist sinnlos. Deshalb werden **Zuweisungen an Zeigervariablen** vom Compiler normalerweise als Fehler betrachtet, wenn der zugewiesene Ausdruck nicht denselben Zeigertyp hat. Die einzigen **Ausnahmen** sind unter 1. bis 4. aufgeführt:

1. Einer Zeigervariablen kann unabhängig vom Datentyp das Literal 0 (Null) zugewiesen werden.

```
int* pi = 0;
```

Da keine Variable die Adresse 0 haben kann, bringt man mit diesem Wert meist zum Ausdruck, dass eine Zeigervariable nicht auf einen reservierten Speicherbereich zeigt. Das Ganzzahlliteral 0 ist der einzige Ganzzahlwert, den man einem Zeiger ohne eine explizite Typkonversion zuweisen kann. Ein solcher Zeiger wird auch als **Nullzeiger** bezeichnet.

In C wird anstelle des Literals 0 meist das Makro NULL verwendet. Dafür besteht in C++ keine Notwendigkeit. In C++11 kann anstelle von 0 auch das Literal *nullptr* (ein Schlüsselwort) verwendet werden:

```
int* pi = nullptr;
```

*nullptr* kann implizit nur in einen Zeiger, aber in keinen anderen Typ (auch nicht in *int*) konvertiert werden. Wenn man eine Zeigervariable bei ihrer Definition nicht mit der Adresse eines reservierten Speicherbereichs initialisieren kann, empfiehlt es sich immer, sie mit dem Wert 0, oder noch besser, mit *nullptr* zu initialisieren:

Hält man diese Konvention konsequent ein, kann man durch eine Abfrage auf den Wert *nullptr* bzw. 0 immer feststellen, ob der Zeiger auf einen reservierten Speicherbereich zeigt oder nicht:



```
if (pi != nullptr) // bzw. if (pi != 0)
    s = s + *pi;
else ; // *pi nicht definiert!
```

Diese Konvention erweist sich selbst dann als vorteilhaft, man eine solche Prüfung vergisst, da eine Dereferenzierung des Nullzeigers immer zu einer Zugriffsverletzung führt. Bei der Dereferenzierung eines Zeigers mit einem unbestimmten Wert ist dagegen eine Zugriffsverletzung keineswegs sicher, da der Zeiger zufällig auch auf reservierten Speicher zeigen kann.

Das Literal *nullptr* ermöglicht bei überladenen Funktionen wie

```
void f(int n) {}
void f(void* p) {}
```

auch den Aufruf der zweiten Funktion mit einem Literal. Da der Datentyp von 0 *int* ist, führt der Aufruf `f(0)` immer zum Aufruf von `f(int)`. Mit `f(nullptr)` wird dagegen `f(void*)` aufgerufen.

Generell ist es empfehlenswert, *nullptr* anstelle von 0 zu verwenden.

2. Mit einer **expliziten Typkonversion** (siehe Abschnitt 6.3) kann man einer Zeigervariablen einen Zeiger auf einen anderen Datentyp zuweisen. Solche Typkonversionen sind aber meist weder notwendig noch sinnvoll.
3. Der Datentyp *void\** wird als **generischer Zeigertyp** bezeichnet. Einem generischen Zeiger kann ein Zeiger auf einen beliebigen Zeigertyp zugewiesen werden. Ein generischer Zeiger zeigt aber auf keinen bestimmten Datentyp. Deshalb ist es nicht möglich, einen generischen Zeiger ohne explizite Typkonversion zu dereferenzieren. Mit einer expliziten Typkonversion kann er aber in einen beliebigen Zeigertyp konvertiert werden.

Beispiel: Nach den Definitionen

```
int* pi;
void* pv;
```

ist die erste und die dritte der folgenden Zuweisungen möglich:

```
pv = pi;
pi = pv; // error: 'void*' nicht in 'int*' konvertierbar
pi = (int*)pv; // explizite Konversion im Stil von C
```

Die Dereferenzierung eines generischen Zeigers ist ohne explizite Typkonversion nicht möglich:

```
*pi = *pv; // error: Ungültige Dereferenzierung
int i = *((int*)pv); // explizite Konversion im Stil von C
```

Generische Zeiger werden vor allem in C für Funktionen und Datenstrukturen verwendet, die mit Zeigern auf beliebige Datentypen arbeiten können. In C++ sind sie aber meist weder notwendig noch sinnvoll.

4. Einem Zeiger auf ein Objekt einer Basisklasse kann auch ein Zeiger auf ein Objekt einer abgeleiteten Klasse zugewiesen werden (siehe Abschnitt 8.3.7).

Zeiger desselben Datentyps können mit `==`, `!=`, `<`, `<=`, `>` oder `>=` verglichen werden. Das Ergebnis ergibt sich aus dem **Vergleich der Adressen**. Unabhängig vom Datentyp ist ein Vergleich mit dem Wert 0 (Null) möglich.

## Aufgaben 6.2

Schreiben Sie die Lösungsfunktionen in eine wie in Abschnitt 1.2.5 beschriebene Header-Datei (z.B. mit dem Namen „Loesungen-Kap-6.h“) und rufen Sie diese auf.

1. Nach den Definitionen

```
int i = 5;
int *pi, pj;
char *pc, pd;
```

sollen die folgenden Zuweisungen in einem Programm stehen:

- |                              |                               |
|------------------------------|-------------------------------|
| a) <code>pi = i;</code>      | b) <code>pi = &amp;i;</code>  |
| c) <code>*pi = i;</code>     | d) <code>*pi = &amp;i;</code> |
| e) <code>pi = pj;</code>     | f) <code>pc = &amp;pd;</code> |
| g) <code>pi = pc;</code>     | h) <code>pd = *pi;</code>     |
| i) <code>*pi = i**pc;</code> | j) <code>pi = 0;</code>       |

Geben Sie an, welche dieser Zuweisungen syntaktisch korrekt sind. Geben Sie außerdem für jeden syntaktisch korrekten Ausdruck den Wert der linken Seite an, wobei die Ergebnisse der zuvor ausgeführten Anweisungen vorausgesetzt werden sollen. Falls die linke Seite ein Zeiger ist, geben Sie den Wert der dereferenzierten Variablen an.

2. Beschreiben Sie das Ergebnis der folgenden Anweisungen:

- a) 

```
int j = 10;
int* p = &j;
*p = 17;
cout << j << endl;
cout << p << endl;
```
- b) 

```
*(new int) = 17;
```

```
c) int* f_retp()
{
    int x = 1;
    return &x;
}

cout << *f_retp() << endl;
```

## 6.3 Explizite Konversionen $\Theta$

Mit einer **expliziten Typkonversion**

```
static_cast<T>(x); // konvertiere den Wert x in den Datentyp T
```

kann man einen Wert  $x$  in einen Datentyp  $T$  konvertieren, auch wenn für die beteiligten Datentypen keine implizite Standardkonversion (siehe Abschnitt 2.3.5) definiert ist. Solche Konversionen sind aber meist weder notwendig noch sinnvoll.

Von der in C verbreiteten `typedef`-Schreibweise oder der Schreibweise im Funktionsstil für eine Konversion wird abgeraten, da diese leicht übersehen werden und auch nicht vor Fehlern warnen.

Beispiel: Der *double*-Wert

```
double d = 3.14;
```

wird mit

```
int i = static_cast<int>(d);
```

wie bei einer impliziten Standardkonversion in einen *int*-Wert konvertiert. Mit den Schreibweisen von C

```
int i = (int)d; // Konversion typedef-Schreibweise von C
int i = int(d); // Konversion im Funktionsstil von C
```

erhält man dasselbe Ergebnis. Bei einer einschränkenden Konvertierung erhält man keine Fehlermeldung.

Bei Zeigern sind die Konversionen in der Schreibweise von C möglich.

Beispiel: Nach der Konversion von *pi* in *pd*

```
int i = 17;
int* pi = &i;
double* pd = (double*)pi; // konvertiert pi in double*
```

ist *\*pd* die 8 Bytes breite *double*-Variable ab der Adresse in *pi*. Das Bitmuster von *i* (Binärdarstellung) wird dabei als das einer Gleitkommazahl (Mantisse usw.) interpretiert und stellt einen sinnlosen Wert dar.

Da ab der Adresse in *pi* nur 4 Bytes für eine *int*-Variable reserviert sind, kann der Zugriff auf *\*pd* zu einer Zugriffsverletzung und zu einem Programmabsturz führen.

Von *static\_cast* wird eine solche Konversion verweigert:

```
pd = static_cast<double*>(pi); // Fehler: ungültige Typkonvertierung
```

Damit man nicht versehentlich solche sinnlosen Konversionen durchführt, sollte man für explizite Konversionen immer *static\_cast* verwenden.

Für selbstdefinierte Datentypen kann mit Konversionsfunktionen (siehe Abschnitt 8.2.10) individuell gesteuert werden, ob implizite oder explizite Konversionen zulässig sind.

Konversionen mit *const\_cast* und *reinterpret\_cast* sollten vermieden werden. Diese führen meist keinerlei Konversionen durch, sondern unterbinden nur Fehlermeldungen des Compilers, die man eigentlich nicht ignorieren sollte.

## 6.4 Ablaufprotokolle für Zeigervariable

Man kann auch das Ergebnis von **Anweisungen mit Zeigervariablen** durch **Ablaufprotokolle** darstellen. Da zu einer Zeigervariablen *p* auch eine dereferenzierte Variable *\*p* gehört, muss man in ein solches Ablaufprotokoll für jeden Zeiger eine zusätzliche Spalte für die dereferenzierten Werte aufnehmen. Da *\*p* der Wert an der Adresse in *p* ist, kann sich

- mit einer Änderung von *p* auch *\*p* ändern, und
- mit einer Änderung von *\*p* auch der Wert aller der Variablen *v* ändern, die denselben Speicherbereich wie *\*p* belegen.

Deshalb muss man in einem Ablaufprotokoll für Anweisungen mit Zeigern

- bei jeder Änderung eines Zeigers auch den dereferenzierten Wert ändern, und
- bei jeder Änderung eines dereferenzierten Wertes *\*p* auch die Werte aller der Variablen *v* ändern, für die *p==&v* gilt.

Da ein Zeiger *p* eine Hauptspeicheradresse darstellt, die bei der Erstellung eines Ablaufprotokolls nicht bekannt ist (da sie vom Compiler oder zur Laufzeit bestimmt wird), und der Wert dieser Variablen auch meist irrelevant ist, kann man für den Wert einer Zeigervariablen *p* das Symbol *p<sub>0</sub>* bzw. *p<sub>0</sub>* verwenden.

Beispiel: Die Anweisungen

```

int a = 17, b = 18;
int* px = &a;
int* py = &b;
px = py;
*py = 19;
a = 20;
px = &a;
py = px;

```

kann man in dem Ablaufprotokoll darstellen:

|                | a  | b  | px  | *px | py  | *py |
|----------------|----|----|-----|-----|-----|-----|
|                |    |    | px0 |     | py0 |     |
| int a=17,b=18; | 17 | 18 |     |     |     |     |
| int* px=&a;    |    |    | &a  | 17  |     |     |
| int* py=&b;    |    |    |     |     | &b  | 18  |
| px=py          |    |    | &b  | 18  |     |     |
| *py=19         |    | 19 |     | 19  |     | 19  |
| a=20;          | 20 |    |     |     |     |     |
| px=&a;         |    |    | &a  | 20  |     |     |
| py=px          |    |    |     |     | &a  | 20  |

Diese Beispiele zeigen insbesondere, dass eine Zuweisung an eine Zeigervariable zur Folge hat, dass sich eine Änderung der einen dereferenzierten Variablen auch auf die andere dereferenzierte Variable auswirkt.

## Aufgaben 6.4

1. In der Programmiersprache C gibt es keine Referenzparameter. Wenn man in C in einer Funktion ein Argument verändern will, übergibt man seine Adresse und verändert die dereferenzierte Variable, wie z.B. in der Funktion

```

void ptr_swap(int* x, int* y)
{
    int h = *x;
    *x = *y;
    *y = h;
}

```

Erstellen Sie ein Ablaufprotokoll für diese Funktion und geben Sie ihre Nachbedingung an.

## 6.5 Dynamisch erzeugte Variablen

Bisher wurden nur Variable verwendet, deren Speicherplatz vom Compiler reserviert wurde. Jetzt wird gezeigt, wie der Speicherplatz auch zur Laufzeit reserviert werden kann. Dann spricht man auch von **dynamischen** bzw. **dynamisch erzeugten Variablen**.

### 6.5.1 *new* und *delete*

Mit dem Operator ***new*** kann man Variablen während der Laufzeit des Programms erzeugen. Dieser Operator versucht, in einem eigens dafür vorgesehenen Speicherbereich (der oft auch als **Heap**, **dynamischer Speicher** oder **freier Speicher** bezeichnet wird) so viele Bytes zu reservieren, wie eine Variable des angegebenen Datentyps benötigt.

Die wichtigsten syntaktischen Varianten ergeben sich aus diesen vereinfachten Syntaxregeln. Dabei steht *new-type-id* im einfachsten Fall für einen Datentyp, auf den eckige Klammern folgen können, zwischen denen ein ganzzahliger Wert steht:

*new-expression:*

`::opt new new-type-id new-initializeropt`

`::opt new ( type-id ) new-initializeropt`

*new-initializer:*

`( expression-listopt )`

`braced-init-list`

Falls der angeforderte Speicher zur Verfügung gestellt werden konnte, liefert *new* seine Adresse zurück. Andernfalls wird eine **Exception** des Typs `std::bad_alloc` ausgelöst, die einen Programmabbruch zur Folge hat, wenn sie nicht mit einer *try*-Anweisung abgefangen wird (siehe Abschnitt 2.9). Da moderne Rechner aber meist genug Speicher (unter Windows meist 2 GB oder mehr) haben, wird in den folgenden Beispielen davon ausgegangen, dass der angeforderte Speicher verfügbar ist.

Falls man nicht will, dass durch *new* eine Exception ausgelöst wird, gibt man `std::nothrow` nach *new* an (siehe Abschnitt 6.5.5). Dann gibt *new* den Wert `nullptr` zurück, wenn der angeforderte Speicher nicht verfügbar ist.

Variablen, die zur Laufzeit erzeugt werden, bezeichnet man auch als **dynamisch erzeugte Variablen**. Wenn der Unterschied zu vom Compiler erzeugten Variablen (wie „`int i;`“) betont werden soll, werden diese als „gewöhnliche“ Variablen bezeichnet. Die folgenden Beispiele zeigen, wie man *new* verwenden kann:

1. Für einen Datentyp *T* reserviert „*new T*“ so viele Bytes auf dem Heap, wie für eine Variable des Datentyps *T* notwendig sind. Der Ausdruck „*new T*“ hat den Datentyp „Zeiger auf *T*“. Sein Wert ist die Adresse des reservierten Speicherbereichs und kann einer Variablen des Typs „Zeiger auf *T*“ zugewiesen werden:

```
int* pi;
pi = new int; //reserviert sizeof(int) Bytes und weist pi
              //die Adresse dieses Speicherbereichs zu
*pi = 17; // initialisiert den reservierten Speicherbereich
```

Am besten initialisiert man eine Zeigervariable immer gleich bei ihrer Definition:

```
int* pi = new int; // initialisiert pi mit der Adresse
*pi = 17;
```

Die explizit geklammerte Version von *new* kann zur Vermeidung von Mehrdeutigkeiten verwendet werden. Für einfache Datentypen sind beide Versionen gleichwertig:

```
pi = new(int); // gleichwertig zu pi=new int;
```

2. In einem *new-expression* kann man nach dem Datentyp einen *new-initializer* wie

```
( expression-listopt )
```

angeben. Er bewirkt die Initialisierung der mit *new* erzeugten Variablen. Für einen fundamentalen Datentyp (wie *int*, *double* usw.) gibt es drei Formen:

- a) Der in Klammern angegebene Wert wird zur Initialisierung verwendet:

```
double* pd = new double(1.5); //Initialisierung *pd=1.5
```

- b) Gibt man keinen Wert zwischen den Klammern an, wird die Variable mit 0 (Null) initialisiert:

```
double* pd = new double(); //Initialisierung *pd=0
```

- c) Ohne einen Initialisierer ist ihr Wert unbestimmt:

```
double* pd = new double; // *pd wird nicht initialisiert
```

Für einen Klassentyp müssen die Ausdrücke Argumente für einen Konstruktor sein (siehe Abschnitt 8.1.5).

3. Gibt man nach einem Datentyp *T* in eckigen Klammern einen ganzzahligen Ausdruck  $\geq 0$  an, wird ein **Array dynamisch erzeugt**.

*direct-new-declarator*:

```
[ expression ]
```

*direct-new-declarator* [ *constant-expression* ]

Die Anzahl der Arrayelemente ist durch den ganzzahligen Ausdruck gegeben. Im Unterschied zu einem C-Array (siehe Abschnitt 4.2) muss diese Zahl keine Konstante sein:

```
typedef double T; // T irgendein Datentyp, hier double
int n = 100;      // nicht notwendig eine Konstante
T* p = new T[n];  // reserviert n*sizeof(T) Bytes
```

Die einzelnen Elemente des Arrays können wie bei einem C-Array angesprochen werden:

```
p[0], ..., p[n-1] // n Elemente des Datentyps T
```

Ein dynamisch erzeugtes Array kann einer Initialisierungsliste initialisiert werden:

```
T* p = new T[n]{ 2,3,5 };
```

Eine gewöhnliche Variable existiert von ihrer Definition bis zum Ende des Bereichs (bei einer lokalen Variablen ist das der Block), in dem sie definiert wurde. Im Unterschied dazu existiert eine dynamisch erzeugte Variable bis der für sie reservierte Speicher mit dem Operator *delete* wieder freigegeben oder das Programm beendet wird. Man sagt auch, dass eine dynamisch erzeugte Variable durch den Aufruf von *delete* **zerstört** wird.

*delete-expression:*

`::opt delete cast-expression`

`::opt delete [ ] cast-expression`

Die erste dieser beiden Alternativen ist für Variable, die keine Arrays sind, und die zweite für Arrays. Dabei muss *cast-expression* ein Zeiger sein, dessen Wert das Ergebnis eines *new*-Ausdrucks ist. Nach *delete p* ist der Wert von *p* unbestimmt und der Zugriff auf *\*p* unzulässig. Falls *p* den Wert 0 hat, ist *delete p* wirkungslos.

Damit man mit dem verfügbaren Speicher sparsam umgeht, sollte man den Operator *delete* immer dann aufrufen, wenn eine mit *new* erzeugte Variable nicht mehr benötigt wird. Unnötig reservierter Speicher wird auch als **Speicherleck (memory leak)**, siehe Abschnitt 6.7) bezeichnet. Ganz generell sollte man diese **Regel** beachten: Jede mit *new* erzeugte Variable sollte mit *delete* auch wieder freigegeben werden.

Die folgenden Beispiele zeigen, wie die in den letzten Beispielen reservierten Speicherbereiche wieder freigegeben werden.

1. Der Speicher für die unter 1. und 2. erzeugten Variablen wird folgendermaßen wieder freigegeben:

```
delete pi;
delete pd;
```

2. Der Speicher für das unter 3. erzeugte Array wird freigegeben durch

```
delete[] p;
```

3. Es ist möglich, die falsche Form von *delete* zu verwenden, ohne dass der Compiler eine Warnung oder Fehlermeldung ausgibt:

```
delete[] pi; // Arrayform für Nicht-Array
delete p;    // Nicht-Arrayform für Array
```

Im C++-Standard ist explizit festgelegt, dass das Verhalten nach einem solchen falschen Aufruf undefiniert ist.

Bei einer Codeanalyse (siehe Abschnitt 2.13) mit den "Von Microsoft empfohlenen native Regeln" wird aber auf die falsche Form von *delete* hingewiesen:

```
C* p3 = new C;
delete[] p3; //warning C6279: "p3" wird mit dem new-Skalaroperator
             // zugeordnet, aber mit dem delete []-Arrayoperator gelöscht.
```



In Abschnitt 6.2 wurde empfohlen, einen Zeiger, der nicht auf reservierten Speicher zeigt, immer auf 0 (Null) zu setzen. Deshalb sollte man einen Zeiger nach *delete* immer auf 0 setzen, z.B. nach Beispiel 1:

```
pi = nullptr;
pd = nullptr;
```

Es gibt Anwendungsbereiche (manche embedded-Anwendungen), bei denen kein *new* und *delete* verwendet werden darf, da dadurch der Speicher fragmentiert werden kann.

### 6.5.2 Der Unterschied zu „gewöhnlichen“ Variablen

Die wichtigsten Unterschiede zwischen dynamisch erzeugten und „gewöhnlichen“ (vom Compiler erzeugten) Variablen sind:

1. Eine dynamisch erzeugte Variable hat im Unterschied zu einer gewöhnlichen Variablen **keinen Namen** und kann **nur indirekt** über einen Zeiger angesprochen werden.

Nach einem erfolgreichen Aufruf von *p=new type* enthält der Zeiger *p* die Adresse der Variablen. Falls *p* überschrieben und nicht anderweitig gespeichert wird, gibt es keine Möglichkeit mehr, sie anzusprechen, obwohl sie weiterhin existiert und Speicher belegt. Der für sie reservierte Speicher wird erst beim Ende des Programms wieder freigegeben.

Da zum Begriff „Variable“ nach den Ausführungen von Abschnitt 2.2 auch ihr Name gehört, ist eine „namenlose Variable“ eigentlich widersprüchlich. Im C++-Standard wird „object“ als Oberbegriff für namenlose und benannte Variablen verwendet. Ein **Objekt** in diesem Sinn hat wie eine Variable einen Wert, eine Adresse und einen Datentyp, aber keinen Namen. Da der Begriff „Objekt“ aber auch oft für Variable eines Klassentyps verwendet wird, wird zur Vermeidung von Verwechslungen auch der Begriff „namenlose Variable“ verwendet.

2. Der Name einer gewöhnlichen Variablen ist untrennbar mit reserviertem Speicher verbunden. Es ist nicht möglich, über einen solchen Namen nicht reservierten Speicher anzusprechen. Im Unterschied dazu existiert ein Zeiger *p*, über den eine dynamisch erzeugte Variable angesprochen wird, unabhängig von dieser Variablen. Ein Zugriff auf *\*p* ist nur nach *new* und vor *delete* zulässig. Vor *new p* oder nach *delete p* ist der Wert von *p* unbestimmt und der Zugriff auf *\*p* ein **Fehler**, der einen Programmabbruch zur Folge haben kann:

```
int* pi = new int(17);
delete pi;
...
*pi = 18; // Jetzt knallts - oder vielleicht auch nicht?
```

3. Der Speicher für eine gewöhnliche Variable wird **automatisch** freigegeben, wenn der Gültigkeitsbereich der Variablen verlassen wird. Der Speicher für eine dynamisch erzeugte Variable **muss** dagegen mit genau einem Aufruf von *delete* wieder freigegeben werden.

- Falls *delete* überhaupt nicht aufgerufen wird, kann das eine Verschwendung von Speicher (Speicherleck, memory leak, siehe Abschnitt 6.7) sein. Falls in einer Schleife immer wieder Speicher reserviert und nicht mehr freigegeben wird, können die swap files immer größer werden und die Leistungsfähigkeit des Systems nachlassen.
- Ein zweifacher Aufruf von *delete* mit demselben, von Null verschiedenen Zeiger, ist ein Fehler, der einen Programmabsturz zur Folge haben kann.

Beispiel: Anweisungen wie

```
int* pi = new int(1);
int* pj = new int(2);
```

zur Reservierung und

```
delete pi;
delete pj;
```

zur Freigabe von Speicher sehen harmlos aus. Wenn dazwischen aber eine ebenso harmlos aussehende Zuweisung stattfindet,

```
pi = pj;
```

haben die beiden *delete* Anweisungen den Wert von *pj* als Operanden. Die Anweisung „delete pj“ kann dann zu einem Programmabsturz führen. Der durch „new int(1)“ reservierte Speicher wird überhaupt nicht freigegeben.

- Der Operand von *delete* muss einen Wert haben, der das Ergebnis eines *new*-Ausdrucks ist. Wendet man *delete* auf einen anderen Ausdruck an, ist das außer bei einem Nullzeiger ein Fehler, der einen Programmabbruch zur Folge haben kann. Insbesondere ist es ein **Fehler**, *delete* auf einen Zeiger anzuwenden,
  - dem nie ein *new*-Ausdruck zugewiesen wurde.
  - der nach *new* verändert wurde.
  - auf den bereits *delete* angewendet wurde (siehe 3.)
  - der auf eine gewöhnliche Variable zeigt.

Beispiele: Der Aufruf von *delete* mit *p1*, *p2* und *p3* ist ein Fehler:

```
int* p1;                // a)
int* p2 = new int(1);
p2++;                   // b)
int i = 17;
int* p3 = &i;           // d)
```

- In Abschnitt 6.2 haben wir gesehen, dass eine **Zuweisung** von Zeigern zu Aliasing führen kann. Bei einer Zuweisung an einen Zeiger auf eine dynamisch erzeugte Variable besteht zudem die Gefahr von **Speicherlecks**. Diese können folgendermaßen vermieden werden:
  - Man vermeidet solche Zuweisungen. Diese Strategie wird von der smart pointer Klasse *unique\_ptr* verfolgt (siehe Abschnitte 6.5.3 und 0).

- Der Speicher für eine dynamisch erzeugte Variable wird erst dann wieder freigegeben, wenn es keine Referenz mehr auf diese Variable gibt. Diese Strategie wird von der smart pointer Klasse *shared\_ptr* verfolgt (siehe Abschnitte 8.1.6 und 18.3).
6. Bei gewöhnlichen Variablen prüft der Compiler bei den meisten Operationen anhand des Datentyps, ob sie zulässig sind oder nicht. Ob für einen Zeiger *delete* aufgerufen werden muss oder nicht aufgerufen werden darf, ergibt sich dagegen nur aus dem bisherigen Ablauf des Programms.

Beispiel: Nach Anweisungen wie den folgenden ist es unmöglich, zu entscheiden, ob *delete p* aufgerufen werden muss oder nicht:

```
int i, x;
int* p;
if (x>0) p = &i;
else p = new int;
```

Diese Beispiele zeigen, dass mit dynamisch erzeugten Variablen **Fehler** möglich sind, die mit „gewöhnlichen“ Variablen nicht vorkommen können. Zwar sehen die Anforderungen bei den einfachen Beispielen hier gar nicht so schwierig aus. Falls aber *new* und *delete* in verschiedenen Teilen des Quelltextes stehen und man nicht genau weiß, welche Anweisungen dazwischen ausgeführt werden, können sich leicht Fehler einschleichen, die nicht leicht zu finden sind.

- Deshalb sollte man „gewöhnliche“ **Variablen** möglichst immer **vorziehen**.
- Falls sich Zeiger nicht vermeiden lassen, sollte man möglichst **smart pointer** verwenden.

Dynamisch erzeugte Variable bieten in der bisher verwendeten Form keine Vorteile gegenüber „gewöhnlichen“ Variablen. Sie sind aber notwendig, wenn Informationen erst zur Laufzeit und nicht schon bei der Kompilation verfügbar sind. So können zum Beispiel

- bei dynamisch erzeugten Arrays die Größe und
- bei verketteten Datenstrukturen (wie Listen und Bäume, siehe Abschnitte 6.8 und 6.9) die Verkettung

während der Laufzeit festgelegt werden. Einem Zeiger auf ein Objekt einer Basisklasse kann ein Objekt einer abgeleiteten Klasse (siehe Abschnitt 8.4.2) zugewiesen werden. Aus diesem Grund werden die Objekte von Klassenhierarchien oft dynamisch erzeugt.

In der Programmiersprache C gibt es anstelle von *new* und *delete* die Funktionen *malloc* bzw. *free*. Sie funktionieren im Prinzip wie *new* und *delete* und können auch in C++ verwendet werden. Da sie aber mit *void\**-Zeigern arbeiten, sind sie fehleranfälliger. Deshalb sollte man immer *new* und *delete* gegenüber *malloc* bzw. *free* bevorzugen.

### 6.5.3 Der Smart Pointer Typ *unique\_ptr*

Viele Probleme mit Zeigern werden mit smart pointern vermieden. Diese werden in Kapitel 18 ausführlich beschrieben. Hier soll ein kurzer Überblick die wichtigsten Vorteile von smart pointern des Typs *unique\_ptr* aufzeigen. Dieser Datentyp steht nach

```
#include <memory> // oder import std.memory; (siehe Abschnitt 2.13)
using namespace std; // bzw. using std::unique_ptr;
```

zur Verfügung. Dann erhält man mit

```
unique_ptr<int> u = std::make_unique<int>(17); // int* u = new int(17);
unique_ptr<T> v = std::make_unique<T>(); // T* v = new T(); T ein
                                   beliebiger Datentyp mit einem Standardkonstruktor
```

die smart pointer *u* und *v*, die man im Wesentlichen wie die im Kommentar angegebenen Zeiger verwenden kann. Der entscheidende Vorteil eines smart pointers ist aber, dass der zugehörige Speicher nicht explizit wie mit *delete* freigegeben werden muss, sondern automatisch beim Verlassen des Blocks freigegeben wird, wenn der Block verlassen wird, in dem der smart pointer definiert wurde.

Beispiel: Nach dem Verlassen der Funktion

```
void use_smart_pointer()
{
    std::unique_ptr<int> u = std::make_unique<int>(17);
    *u = 18; // verwende u wie einen gewöhnlichen Zeiger
    // u++; // Fehler: Zeigerarithmetik geht nicht
} // der Speicher für *u wird automatisch freigegeben
```

wird der Speicherbereich automatisch wieder freigegeben, ohne dass man dazu irgendeine Aktion wie z.B. *delete* ausführen muss.

Für *unique\_ptr* sind keine Zuweisungen möglich. Deshalb kann es auch nicht wie bei einem gewöhnlichen Zeiger passieren, dass zwei Zeiger nach einer Zuweisung auf denselben Speicherbereich zeigen, so dass das *delete* mit dem zweiten Zeiger zu einem Programmabsturz führt.

Beispiel: Obwohl die beiden Funktionen

```
int* pi;
int* pj;

void initPtr()
{
    pi = new int(17);
    pj = new int(18);
}
```

```
void finitPtr()
{
    delete pi;
    delete pj;
}
```

auf den ersten Blick korrekt aussehen und die Anforderung erfüllen, dass zu jedem *new* ein *delete* gehört, ist mit ihnen trotzdem z.B. das Problem möglich: Wenn zwischen den Aufrufen der beiden Funktionen eine Zuweisung

```
pi = pj;
```

stattfindet, ist das Ergebnis der zweiten *delete*-Operation undefiniert.

*unique\_ptr* sind oft angemessen, wenn globale oder lokale Variable auf einen dynamisch erzeugten Speicherbereich zeigen sollen.

Bei einer Codeanalyse mit den C++ Core Guidelines (siehe Abschnitt 2.13) wird empfohlen, anstelle von *new* einen smart pointer und *make\_unique* zu verwenden:

```
int* p = new int; // warning C26409: Rufen Sie "new" und "delete"
                 // nicht auf, verwenden Sie stattdessen "std::make_unique<T>" (r.11).
```

## 6.5.4 Dynamische erzeugte eindimensionale Arrays

Normalerweise brauchen und sollen Sie keine dynamischen Arrays verwenden. Die C++-Standardbibliothek enthält Container (z.B. *vector* und *deque*, siehe Abschnitte 4.2.3 und 11.1), die bei den allermeisten Anwendungen besser geeignet sind. Diese verwenden intern dynamische Arrays. Da sich einige grundlegende Eigenschaften der Container aus den dynamischen Arrays ergeben, ist ein Grundverständnis von dynamischen Arrays aber hilfreich.

Ein dynamisch erzeugtes Array *a* mit *n* Elementen des Datentyps *T* wird durch

```
int n = 10; // n muss keine Konstante sein
T* a = new T[n]; // new reserviert den Speicher während der Laufzeit
```

angelegt. Dabei wird der Speicherplatz für die Arrayelemente während der Laufzeit des Programms durch vordefinierte Funktionen zur Speicherverwaltung reserviert. Im Unterschied zu einem vom Compiler erzeugten Array *b* muss die Anzahl der Elemente keine Konstante sein:

```
const int m = 10; // m muss eine Konstante sein
T b[m]; // Der Speicher für das Array b wird vom Compiler reserviert
```

Die *n* Elemente kann man wie bei einem C-Array ansprechen:

```
a[0], a[1], ..., a[n-1]
```

Beim Zugriff auf die Arrayelemente besteht also kein Unterschied zu einem vom Compiler erzeugten Array. Insbesondere muss man immer darauf achten, dass man als Index in `a[i]` einen zulässigen Wert zwischen  $0 \leq i < n$  verwendet. Dem Vorteil, dass man die Größe nicht schon bei der Kompilation angeben muss, stehen aber auch die Nachteile gegenüber, die schon in Abschnitt 6.5.2 für alle mit *new* erzeugten Variablen beschrieben wurden. Um nur die wichtigsten zu nennen:

- Der mit *new* reservierte Speicherbereich für das Array *a* muss mit ***delete[]*** *a* wieder freigegeben werden.
- Bei einer Zuweisung an einen Zeiger muss man darauf achten, dass der Speicherbereich auf den die linke Seite zeigt, auch wieder freigegeben werden kann.

Seit C++11 kann man ein dynamisch erzeugtes Array auch bei seiner Definition mit einer **Initialisierungsliste** initialisieren. Dazu gibt man die Initialisierungsliste nach der Definition des Arrays an. Eine Zuweisung einer Initialisierungsliste an ein dynamisches Array ist aber nicht möglich.

Beispiel: Werte, die nicht in der Initialisierungsliste angegeben sind, werden auf 0 gesetzt:

```
int* da = new int[5]{2, 3}; // da[0]=2, da[1]=3, i>=2:da[i]=0
int* db = new int[5]{ }; // Alle Elemente sind 0
```

Für eine solche Initialisierung war früher ein Ausdruck wie `memset` notwendig:

```
int* dc = new int[5];
memset(dc, 0, 5*sizeof(int));
```

Die Größe eines dynamisch erzeugten Arrays kann nicht direkt geändert werden. Man kann allerdings ein neues dynamisches Array anlegen, in dieses die Elemente des alten Arrays kopieren (maximal so viele, wie das neue Array Elemente hat), und dann den Zeiger auf das neue Array dem des alten Arrays zuweisen.

```
void ReAllocate(T*& a, int n_copy, int n_new)
{
    T* pnew = new T[n_new]; // erzeuge das neue Array
    if (n_copy > n_new) n_copy = n_new;
    for (int i = 0; i < n_copy; i++)
        pnew[i] = a[i]; // kopiere das alte Array in das neue
    delete[] a; // Speicher des alten Arrays freigeben
    // Wegen dieser Form von delete darf ReAllocate nur
    // mit einem Argument aufgerufen werden, das auf ein
    // dynamisch erzeugtes Array zeigt.
    a = pnew; // Zeiger auf das neue Array zurückgeben.
}
```

Funktionen zur Verwaltung dynamischer Arrays stehen auch in der C-Standardbibliothek zur Verfügung. Die Funktion ***realloc*** verwendet als Parameter generische Zeiger, was zur Folge hat, dass der Compiler keine Typen prüfen kann.

```
void *realloc(void *block, size_t size);
```

### Aufgaben 6.5.4

1. Überarbeiten Sie eine Kopie Ihrer Lösung von Aufgabe 4.2, 2. (Sieb des Eratosthenes) so, dass die Anzahl der Arrayelemente als Parameter übergeben wird und das Array dynamisch angelegt wird. Der Aufwand für die Änderung soll möglichst gering sein.
2. Implementieren Sie die Funktion *ReAllocate* und testen Sie diese mit einem dynamisch erzeugten Array mit zunächst 2 Elementen, dessen Größe immer wieder verdoppelt wird. Der Test soll einfach nur darin bestehen, dass nach jeder Verdoppelung immer alle Elemente angesprochen werden.

Beschreiben Sie das Ergebnis der folgenden Anweisungen:

```
a) int* p1;           ReAllocate(p1, 0, 100);
b) int* p2 = new int; ReAllocate(p2, 0, 100);
c) int x; int* p3 = &x; ReAllocate(p3, 0, 100);
d) int* p4 = new int[1]; ReAllocate(p4, 0, 100);
```

### 6.5.5 nothrow-new Θ

Der vordefinierte *new*-Operator löst eine Exception aus, wenn der angeforderte Speicher nicht verfügbar ist:

```
constexpr unsigned int N{ 4'000'000'000u };
int* p = nullptr;
try { int* p = new int[N]; }
catch (const std::bad_alloc& e)
{ std::cout << e.what() << std::endl; }
```

Eine solche Exception kann man mit der *nothrow*-Variante

```
constexpr unsigned int N{ 4'000'000'000u };
int* p = new(std::nothrow)int[N];
if (p == nullptr)
    cout << "das war zu viel verlangt" << endl;
else
    cout << "es reicht" << p[0] << endl;
```

unterbinden. Dann gibt *new* den Wert *nullptr* zurück, wenn der angeforderte Speicher nicht zur Verfügung gestellt werden kann. Vor jeder weiteren Verwendung des Zeigers muss dann aber geprüft werden, ob sein Wert auch von *nullptr* verschieden ist.

Die Verwendung von

```
T* p = new(std::nothrow) T;
```

garantiert aber nur, dass beim Anlegen von Speicherplatz keine Exception ausgelöst wird. Falls T eine Klasse ist, deren Konstruktor noch extra Speicher anfordert, kann dabei trotzdem noch eine Exception ausgelöst werden.

Normalerweise sollte man die *nothrow*-Variante nicht verwenden. Sie ist im Wesentlichen nur für Anwendungen gedacht, in denen überhaupt keine Exceptions zulässig sind, wie z.B. bei manchen Embedded-Anwendungen. In solchen Anwendungen ist aber oft auch kein dynamischer Speicher zulässig.

## 6.6 Stringlitterale, nullterminierte Strings und *char*\*-Zeiger

In der Programmiersprache C haben Zeiger eine wesentlich größere Bedeutung als in vielen anderen Sprachen, da in C einige Sprachkonzepte Zeiger verwenden, die in anderen Sprachen ohne Zeiger auskommen. Dazu gehören z.B. Zeichenketten (Strings), die durch Zeiger auf nullterminierte Strings dargestellt werden.

Ein **Stringliteral** ist eine durch Anführungszeichen begrenzte Zeichenfolge wie

```
"Hallo"
```

Ein Stringliteral hat in Standard-C++ den **Datentyp** `const char[n+1]` (siehe Abschnitt 4.2), wobei *n* die Länge des Strings ist. Der Compiler reserviert für die Zeichen des Stringliterals einen Speicherbereich, in dem er die Zeichen des Literals ablegt. Nach dem letzten Zeichen fügt er ein **Nullzeichen** `'\0'` („**Nullterminator**“, alle Bits Nullen) an, um das Ende des Strings zu kennzeichnen. Deshalb belegt `"Hallo"` 6 Bytes und nicht nur 5. Aus dieser Art der Kennzeichnung ergibt sich auch der Name **nullterminierter String**.

Der Compiler konvertiert ein Stringliteral in die Adresse seines ersten Zeichens. Deshalb ist die nächste Zuweisung zulässig:

```
const char* s = "Hallo";
```

Dabei erhält die Zeigervariable *s* die Adresse des ersten Zeichens 'H' des Literals. Eine solche Zuweisung kopiert also nicht alle Zeichen des Strings, obwohl das auf den ersten Blick so aussieht. Ebenso wenig werden durch

```
const char* t = s;
```

die Zeichen des **Strings** *t* nach *s* **kopiert**. Vielmehr wird durch eine solche Zuweisung die Adresse in *s* nach *t* kopiert.

Im Unterschied zu jedem anderen Zeigertyp akzeptieren C++ Compiler aus historischen Gründen auch Zuweisungen und Initialisierungen von nicht konstanten *char*\* Zeigervariablen mit Stringlitteralen:

```
char* t = ".."; // deprecated, const char* t=".." wäre ok
```

Solche Zuweisungen sind in C verbreitet. Im C++-Standard sind sie dagegen als „deprecated“ klassifiziert, was bedeutet, dass man sie vermeiden soll. Sie ermöglichen die Veränderung des konstanten Stringliterals, was zu undefiniertem Verhalten führen kann:

```
t[1] = 'x'; // Programmabsturz möglich (undefined behavior)
```



Dass für Stringlitterale Variable des Typs *const char \** verlangt werden ist keine ernsthafte Einschränkung, da sie meist nur als Namen für das Stringliteral verwendet werden. Es besteht fast nie ein Anlass, eine solche Variable zu verändern.

Der Speicher für ein Stringliteral wird immer statisch (wie eine globale Variable) angelegt. Deshalb ist die Adresse eines lokalen Stringliterals auch außerhalb einer Funktion gültig, im Unterschied zu einer lokalen Variablen eines anderen Datentyps:

```
const char* Message()      const int* DontDoDat()
{
    return "Hello";
}
{
    int i;
    return &i;
}
```

Der Datentyp *char\** wird oft als Zeiger auf das erste Zeichen eines nullterminierten Strings interpretiert, obwohl ein solcher Zeiger auch auf ein einzelnes Zeichen zeigen kann, auf das kein Nullterminator folgt. Zur Bearbeitung eines solchen Strings werden dann alle Zeichen ab dieser Adresse bis zum nächsten Nullterminator bearbeitet.

Das soll am Beispiel einer Funktion *my\_strcpy* illustriert werden. Sie kopiert alle Zeichen ab der Adresse in *t* bis zum nächsten Nullterminator einzeln in das *char* Array ab *s*. Als kleine Anwendung der **Zeigerarithmetik** werden die Zeiger mit *+1* um 1 (*sizeof(char)*) erhöht:

```
void my_strcpy(char* s, const char* t) // wie strcpy
{ // kopiert den nullterminierten String t nach s
    *s = *t;
    while ((*t) != '\0') // kürzer: while (*t)
    {
        s = s + 1; // Zeigerarithmetik, s++ und t++ geht auch
        t = t + 1;
        *s = *t;
    }
}
```

Nur als Randbemerkung: Kernighan und Ritchie (1988, Abschnitt 5.5) schreiben diese Funktion etwas kürzer. Bei ihnen besteht der gesamte Anweisungsteil aus einer leeren Anweisung „“:

```
while (*s++ = *t++); // das müssen Sie nicht verstehen
```

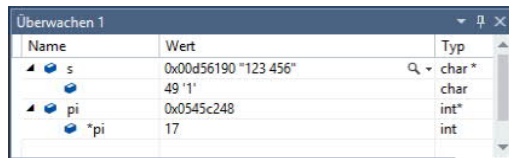
Die Verwendung solcher Funktionen ist **nicht ohne Risiko**: Falls ab der Zieladresse weniger Speicher reserviert ist als die Quelle benötigt, wird nicht reservierter Speicher gnadenlos überschrieben, und das Programm kann abstürzen. Der Grund dafür ist einfach, dass nur Zeiger übergeben werden. Und an einem Zeiger kann man nicht erkennen, wie viel Speicher ab der Adresse reserviert ist.

Auch im Debugger wird ein *char\** Ausdruck als ein Zeiger auf das erste Zeichen eines nullterminierten Strings interpretiert.

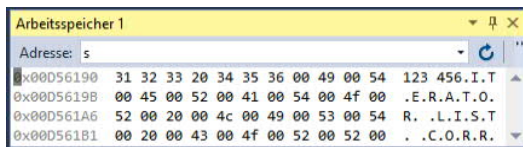
Beispiel: Zeigt man einen Ausdruck `s` des Datentyps `char*` im Debugger an, werden sowohl seine Adresse als auch die Zeichen von `*s` bis zum nächsten Nullterminator dargestellt. Im Unterschied dazu wird für andere Zeigertypen nur die Adresse dargestellt. Die Variablen

```
const char* s = "123 456";
int* pi = new int(17);
```

werden im Debugger folgendermaßen dargestellt:



Der von einem nullterminierten String belegte Speicher kann im Debugger mit *Debuggen|Fenster|Arbeitsspeicher* angezeigt werden. Hier sieht man auch das Nullzeichen '\0' (hex 00) am Ende des Strings:



Nach `#include <string.h>` sind unter anderem die folgenden Funktionen der C Standardbibliothek für nullterminierte Strings verfügbar. Sie handeln sich alle wie `my_strcpy` von einem als Argument übergebenen Zeiger bis zum nächsten Nullterminator durch. Deshalb dürfen sie nur mit Argumenten aufgerufen werden, bei denen

- die Zeiger für eine Quelle auf einen nullterminierten String zeigen, und
- die Zeiger für einen Zielbereich auf genügend reservierten Speicher zeigen.

Da die Überprüfung dieser Voraussetzungen oft nicht einfach ist oder vergessen werden kann, ist ihre Verwendung nicht ungefährlich.

`size_t strlen(const char *s);`

Der Rückgabewert ist die Länge des nullterminierten Strings, auf den `s` zeigt (ohne den Nullterminator '\0'). Dabei werden ab `*s` die Zeichen bis zum nächsten Nullterminator gezählt.

`char *strcpy(char *dest, const char *src);`

Kopiert alle Zeichen ab der Adresse in `src` bis zum nächsten Nullterminator in die Adressen ab `dest` (wie `my_strcpy`).

`int strcmp(const char *s1, const char *s2);`

Vergleicht die nullterminierten Strings, auf die `s1` und `s2` zeigen, zeichenweise als *unsigned char*. Der Vergleich beginnt mit dem ersten Zeichen und wird so lange fortgesetzt, bis sich die beiden Zeichen unterscheiden oder bis das Ende eines der Strings erreicht ist. Falls `s1==s2`, ist der Rückgabewert 0. Ist `s1 < s2`, ist der Rückgabewert `< 0` und andernfalls `> 0`.

Da der Compiler den Namen eines Arrays als Zeiger auf sein erstes Element interpretiert, kann ein mit einem Stringliteral initialisiertes Array

```
char s[] = "Leonard gibt mit der Kaffeemühle Vollgas";
```

wie ein Zeiger auf das erste Zeichen eines nullterminierten Strings verwendet werden. Deswegen können mit einem solchen Array auch alle Funktionen für nullterminierte Strings aufgerufen werden, wie z.B.

```
int n = strlen(s);
```

Einem *string* kann man einen Zeiger auf einen nullterminierten String zuweisen:

```
const char* p = "abc";
string s = p; // s = "abc";
s = p;       // s = "abc";
```

Der *string* besteht dann aus allen Zeichen ab der Adresse `p` bis zum nächsten Nullterminator.

## Aufgaben 6.6

Schreiben Sie die Lösungsfunktionen in eine wie in Abschnitt 1.2.5 beschriebene Header-Datei (z.B. in die schon für Aufgabe 6.5 angelegte Header-Datei) und rufen Sie diese auf.

- Schreiben Sie eine Funktion, die die Anzahl der Leerzeichen ' ' in einem als Parameter übergebenen nullterminierten String (*char\**) zurückgibt.
  - Entwerfen Sie systematische Tests für diese Funktion (siehe Abschnitt 2.6.5).
  - Schreiben Sie eine Testfunktion (am einfachsten mit hart kodierten Strings) für diese Tests.
- Auch auf einfache Fragen gibt es oft vielfältig widersprüchliche Antworten. So hat vor einiger Zeit jemand in einer Diskussionsgruppe im Internet gefragt, ob die folgenden Anweisungen

```
char *x;
x = "hello";
```

von erfahrenen Programmierern als korrekt angesehen würden. Er erhielt darauf über 100 Antworten, aus denen die folgenden vier ausgewählt wurden. Diese geben insbesondere auch einen Hinweis auf die Qualität mancher Beiträge in solchen Diskussionsgruppen. Begründen Sie für jede Antwort, ob sie korrekt ist oder nicht.

- a) Nein. Da durch diese Anweisungen kein Speicher reserviert wird, überschreibt die Zuweisung einen anderen Speicherbereich.
- b) Diese Anweisungen haben eine Zugriffsverletzung zur Folge. Die folgende Anweisung ist viel besser:

```
char* x = "hello";
```

- c) Antwort auf b):

Welcher Compiler produziert hier eine Zugriffsverletzung? Die beiden Anweisungen sind völlig gleichwertig.

- d) Ich würde die Anweisung

```
char x[] = "hello";
```

vorziehen, da diese `sizeof(char*)` Bytes Speicherplatz reserviert.

- 3. Welche der folgenden Bedingungen sind nach der Definition

```
const char* s = "blablabla";
```

in den *if*-Anweisungen zulässig, und welchen Wert haben sie?

- a) `if (s == " ")...`
- b) `if (*s == " ")...`
- c) `if (*s == 'a' + 1) ...`
- d) `if (s == ' ')...`

- e) Welche Strings stellen s1, s2 und s3 nach den Anweisungen

```
string s1 = s;  
string s2 = s+1;  
string s3 = s+20;
```

dar?

- 4. Die Funktion *Checksum* soll eine einfache Prüfsumme für Namen mit weniger als 10 Zeichen berechnen:

```
int Checksum(const char* name)
{
    char a[10]; // 10 is enough
    strcpy(a, name);
    int s = 0;
    for (int i = 0; a[i] != 0; i++) s = s + a[i];
    return s;
}
```

Beschreiben Sie das Ergebnis dieses Aufrufs:

```
int c = Checksum("Check me, baby");
```

5. Welche der Zuweisungen in a) bis j) sind nach diesen Definitionen zulässig:

```
const int i = 17;
int* p1;          char* q1;
const int* p2;    const char* q2;
int const* p3;    char const* q3;
int* const p4 = p1; char* const q4 = q1;
```

- |              |                |
|--------------|----------------|
| a) p1 = p2;  | f) q1 = q2;    |
| b) p1 = &i;  | g) q1 = "abc"; |
| c) p2 = p1;  | h) q2 = q1;    |
| d) *p3 = i;  | i) *q3 = 'x';  |
| e) *p4 = 18; | j) *q4 = 'y';  |

## 6.7 Memory Leaks finden

Memory leaks sind oft schwer zu finden. Wenn in einem umfangreichen Programm zu einem *new* das *delete* fehlt, findet man dieses *new* bei einer Lektüre des Quelltextes oft nur sehr mühsam.

Memory Leaks kann man oft mit smart pointern vermeiden (siehe Kapitel 18). Der Umgang mit smart pointern ist relativ einfach. Auch wenn Sie noch nicht alle Konzepte kennen, die dabei verwendet werden, sollte es möglich sein, diese einzusetzen. Wenn Sie also mit dynamisch erzeugten Variablen arbeiten müssen, können Sie das Kapitel 18 jetzt schon lesen und einsetzen.

Falls smart pointer nicht passend sind, können Produkte wie Deleaker, Boundschecker, Visual Leaks Detector usw. helfen. Oft reichen auch die in Visual Studio verfügbaren Tools (siehe Abschnitt 6.7.1) oder eigene Tools (siehe Abschnitt 6.7.2) aus.

### 6.7.1 Mit Visual C++ memory-leaks finden Θ

In Visual C++ kann man im Debug-Modus mit

```
int _CrtSetDbgFlag(int newFlag); // nach <crtdbg.h>
```

und geeigneten Argumenten erreichen, dass bei einem Memory Leak nach dem Ende des Programms ein Dump mit Informationen über die Ursache des Memory Leaks erzeugt wird. Fügt man einen Aufruf dieser Funktion am Anfang der *main*-Funktion ein,

```
int main()
{
    _CrtSetDbgFlag(_CRTDBG_ALLOC_MEM_DF | _CRTDBG_LEAK_CHECK_DF);
```

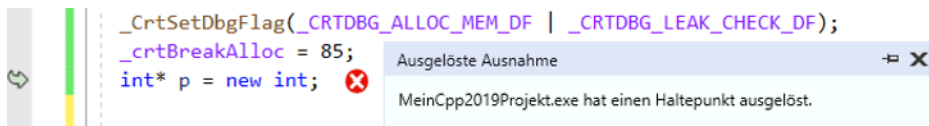
erhält man nach dem Ende des Programms bei einem Memory Leak im Ausgabefenster (*Ansicht|Ausgabe*) Meldungen wie

```
Detected memory leaks!
Dumping objects ->
{85} normal block at 0x00402830, 4 bytes long.
  Data: <    > CD CD CD CD
{152} normal block at 0x004027F0, 16 bytes long.
  Data: <    > CD CD CD CD CD CD CD CD CD CD CD CD CD
{147} normal block at 0x00402350, 20 bytes long.
  Data: <    > 02 00 00 00 03 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
Object dump complete.
```

Fügt man dann nach `CrtSetDbgFlag` noch Anweisungen wie die folgenden ein (dabei ist die Zahl die erste Zahl in geschweiften Klammern aus dem object dump)

```
_crtBreakAlloc = 85;
```

wird bei der entsprechenden Stelle im Programm ein Haltepunkt eingefügt. Das Programm wird dann an der entsprechenden Stelle angehalten:



### 6.7.2 Mit überladenen *new*- und *delete*-Operatoren memory-leaks finden $\Theta$

Die im letzten Abschnitt vorgestellten `_CrtSetDbgFlag`-Anweisungen sind intern mit überladenen *new*- und *delete*-Operatoren implementiert. Diese protokollieren die Aufrufe von *new* und *delete*, so dass man feststellen kann, zu welchem *new* das zugehörige *delete* fehlt.

Mit überladenen *new*- und *delete*-Operatoren (siehe Abschnitt 7.3.3) kann man überprüfen, ob ein Programm **Speicherlecks** hat, weil das *delete* zu einem *new* fehlt. Ein solches Hilfsprogramm wird auch als ***new*-Tracker** bezeichnet.

- Im **einfachsten Fall** zählt man dazu in einem überladenen *new*- und *delete*-Operator die Anzahl der *new*- und *delete*-Aufrufe in einer globalen Variablen mit:

```
int new_counter = 0;    // Anzahl der new-Aufrufe
int delete_counter = 0; // Anzahl der delete-Aufrufe

void* operator new(std::size_t sz)
{ // nicht in einem namespace zulässig
    void* ptr = std::malloc(sz);
```

```

if (ptr)
{
    std::cout << "    ::new size = " << sz << " Adresse=" <<
        size_t(ptr) << std::endl;
    new_counter++;
    return ptr;
}
else throw std::bad_alloc{};
}

void operator delete(void* ptr) noexcept
{ // nicht in einem namespace zulässig
    cout << "    ::delete Adresse " << unsigned int(ptr) << endl;
    delete_counter++;
    std::free(ptr);
}

```

Falls ihre Werte am Programmende nicht gleich sind ist, fehlt mindestens ein *delete*.

Eine ausgefeiltere Variante findet man bei Nico Josuttis (<http://www.cppstd17.com/code/lang/tracknew.hpp.html>).

- Falls ein *delete* fehlt, ist es bei diesem einfachen Ansatz aber schwierig, das entsprechende *new* im Quelltext zu finden. Einen ersten Ansatz zu einer leichteren Fehlerdiagnose erhält man, indem man jede Adresse, die man in *new* von *malloc* (*ptr* im Beispiel oben) erhält, in einen geeigneten Container (z.B. einem *std::set*) ablegt und dann in *delete* wieder entfernt. Falls dieser Container am Programmende nicht leer ist, enthält er alle Adressen, zu denen das *delete* fehlt.

```
#define new new(__FILE__, __LINE__)
```

Dieses Makro verwendet die vordefinierten Makros `__FILE__` und `__LINE__`, die vom Präprozessor durch den aktuellen Dateinamen und die aktuelle Zeilennummer ersetzt werden. Falls sich die Anweisung

```
double* pd = new double;
```

in Zeile 123 der Datei `c:\MeinProjekt\MeinHeader.h` befindet, ersetzt der Präprozessor diese Anweisung durch

```
double* pd = new("c:\\MeinProjekt\\MeinHeader.h", 123) double;
```

Dieser Aufruf führt dann zum Aufruf einer Funktion mit der Signatur (Randbemerkung: Das ist die placement new Syntax)

```
void* operator new(std::size_t sz, char const* file, int line)
```

Definiert man jetzt eine Funktion mit dieser Signatur, die Speicher reserviert und außerdem die Speicheradresse und die Quelltextzeile in einem geeigneten Container ablegt

```
void* operator new(std::size_t sz, char const* file, int line)
{
    return new_track(sz, file, line);
}
```

enthält der Container zu jeder Adresse die Quelltextzeile. Entfernt man diesen Eintrag bei jedem Aufruf von *delete* wieder, enthält der Container beim Programmende nur die Adressen, die nicht mit *delete* gelöscht wurden.

Auf den ersten Blick ist der ideale Container für die Protokollierung ein

```
std::map<void*, std::pair<const char*, int>> map;
```

das zu jeder Adresse ein Wertepaar mit dem Dateinamen und der Zeilennummer enthält. Da ein *map* aber den Speicher dynamisch mit *new* reserviert, werden damit zusätzliche Aufrufe von *new* erzeugt, denen keine Anweisungen entsprechen, die man protokollieren will. Deshalb wird ein *std::array* verwendet, da dieser Container kein *new* verwendet:

```
#include <array>
constexpr int MaxArrayElements = 1000;
```

Dieses Array soll in der Klasse *NewTracker* (zu *inline static* siehe Abschnitt 8.2.12) enthalten sein und zu jeder Adresse (Datentyp *void\**) ein Wertepaar mit dem Dateinamen (Datentyp *const char\**) und der Zeilennummer (Datentyp *int*) enthalten:

```
class NewTracker
{
public:
    inline static std::array<std::pair<void*, std::pair<const
                                char*, int>>, MaxArrayElements> arr;
    inline static int nElements = 0;
```

Mit der Funktion *new\_track* wird wie in der Funktion *operator new* von oben Speicher reserviert. Zusätzlich wird die von *malloc* zurückgegebene Adresse sowie der als Parameter übergebene Dateiname und die Zeilennummer an der nächsten freien Position im Array *arr* abgelegt:

```
static void* new_track(std::size_t sz, const char* file, int line)
{
    void* ptr = std::malloc(sz);
    if (ptr)
    {
        if (nElements < arr.size())
        {
            arr[nElements] = std::pair(ptr, std::pair(file, line));
            nElements++;
        }
        else throw std::runtime_error{ "new_track Array voll" };
        return ptr;
    }
}
```



```
    else throw std::bad_alloc{};
};
```

Eine von *delete* freigegebene Adresse wird mit *delete\_track* wieder aus *arr* entfernt:

```
static void delete_track(void* ptr) noexcept
{ // keine extra Funktion notwendig, das kann auch in delete sein
  std::free(ptr);

  int pos = -1;
  for (int i = 0; i < nElements; i++)
    if (arr[i].first == ptr)
      pos = i;
  if (pos >= 0)
  {
    std::swap(arr[nElements], arr[pos]);
    nElements--;
  }
  else
    cout << unsigned int(ptr) << " nicht gefunden (vermutlich von
                                   der STL reserviert)" << endl;
}
```

Die Elemente des Arrays *arr* werden angezeigt mit

```
static void showLog()
{
  std::cout << "\nNewTracker() - nicht freigegebene Adressen" <<
    std::endl;
  for (int i = 0; i < nElements; i++)
    if (arr[i].first != nullptr)
      std::cout << " " << arr[i].first << ": " << arr[i].second.
        first << " " << arr[i].second.second << std::endl;
  std::cout << std::endl;
}
```

- Nimmt man die überladenen Operatoren *new* und *delete*, das Makro und die Klasse *NewTracker* in eine Datei mit dem Namen *NewTracker.h* auf, reicht ein

```
#include "d:\CPPUtils\newtracker.h"
```

aus, um alle *new*- und *delete*-Anweisungen zu protokollieren, die explizit im Programm enthalten sind. Durch die Anweisungen

```
int* pi = new int;
double* pd = new double;
delete pd;
```

erhält man dann mit

```
NewTracker::showLog();
```

eine Ausgabe wie

```
NewTracker: new Zeile 43 - D:\Beispiele\test-track.h - size =
                                     4 Adresse=2043238928
NewTracker: new Zeile 46 - D:\Beispiele\test-track.h - size =
                                     8 Adresse=2043289552
NewTracker: delete Adresse 2043289552
NewTracker() - nicht freigegebene Adressen
2043238928: D:\Beispiele\test-track.h 43
```

Damit man die Quelltext-Zeile zu einem fehlenden *delete* leicht findet, muss man diese in *new* zusammen mit der Adresse in einem geeigneten Container (z.B. einem *map*) ablegen und in *delete* wieder entfernen.

## 6.8 Verkettete Listen

Wenn man einen Container als sortiertes Array implementiert, muss man nach dem Einfügen oder Löschen von Elementen alle auf das eingefügte bzw. gelöschte Element folgenden Elemente nach hinten oder vorne verschieben, damit die Sortierung erhalten bleibt. Das ist aber bei manchen Anwendungen zu zeitaufwendig.

Diesen Zeitaufwand kann man mit **verketteten Listen** reduzieren. Eine solche Liste besteht aus sogenannten **Knoten**, die Daten und einen Zeiger auf den nächsten Knoten enthalten. Die folgenden Ausführungen sollen nur einfache grundlegende Konzepte zeigen. Für praktische Anwendungen verwenden Sie besser die Klasse *list* (siehe Abschnitt 11.1.8) anstelle der Funktionen von hier.

Im Folgenden wird der Name *T* für den Datentyp der Nutzdaten gewählt, damit man sieht, dass dieser beliebig sein kann. Die Knoten einer verketteten Liste werden meist durch einen Datentyp wie *Listnode* dargestellt:

```
typedef int T; // Datentyp der Nutzdaten

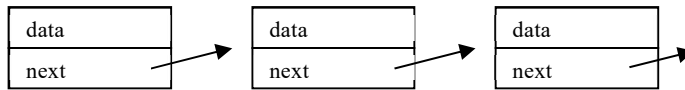
struct Listnode {
    T data;           // die Nutzdaten
    Listnode* next;   // Zeiger auf den nächsten Knoten
};
```

Die Verwendung eines Datentyps in seiner Definition ist nur mit Zeigern oder Referenzen möglich. Ein solcher Datentyp wird auch als rekursiver Datentyp bezeichnet.

Beispiel: Verwendet man einen Datentyp ohne *\** oder *&* in seiner Definition, wird das vom Compiler als Fehler betrachtet:

```
struct Listnode {
    T data;
    Listnode next; // error: verwendet gerade
};                // definiertes Listnode
```

Mit einem Datentyp wie *Listnode* erhält man eine verkettete Liste, indem man mit *new* Variablen dieses Typs erzeugt und in jedem Knoten dem Zeiger *next* die Adresse des nächsten Knotens zuweist:



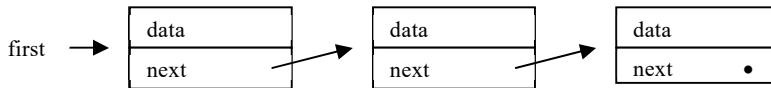
Ein Zeiger wie *first* zeigt auf den **ersten Knoten** der Liste:

```
Listnode* first; // Zeiger auf den ersten Knoten
```

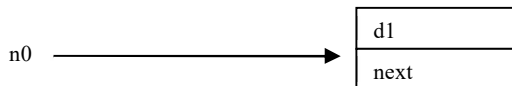
Den **letzten Knoten der Liste** kennzeichnet man durch einen Zeiger *next* mit dem Wert 0. Grafisch wird dieser Wert oft durch einen schwarzen Punkt dargestellt:

•

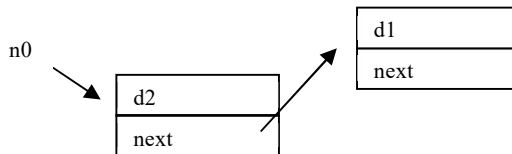
Dann hat die **verkettete Liste** einen eindeutigen Anfang und ein eindeutiges Ende:



Als nächstes sollen Anweisungen gesucht werden, mit denen man vor einem Knoten, auf den ein Zeiger *n0* zeigt,



einen neuen Knoten einfügen kann, auf den *n0* dann zeigt:



Das ist mit den Anweisungen unter 1. und 2. möglich:

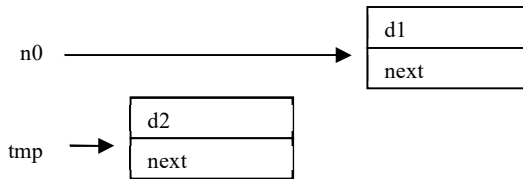
1. Ein Zeiger *tmp* soll auf einen neuen Knoten zeigen, der mit *new* erzeugt wird

```
Listnode* tmp = new Listnode; // 1.1
```

und dem die Daten durch eine Anweisung wie

```
tmp->data = d2; // 1.2
```

zugewiesen werden. Dadurch ergibt sich:



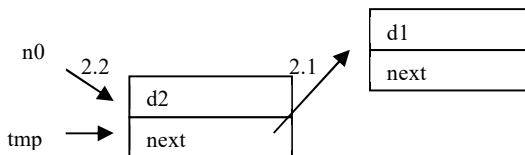
2. Der neue Knoten *\*tmp* wird dann mit den beiden Anweisungen

```

tmp->next = n0;      // 2.1
n0 = tmp;           // 2.2

```

in die Liste eingehängt:



Diese Anweisungen werden mit der Funktion

```

Listnode* newListnode(const T& data, Listnode* next)
{
    // gibt einen Zeiger auf einen neuen Listenknoten
    // {d0,nx0} zurück, wobei d0 und nx0 die Argumente für
    // data und next sind.
    Listnode* tmp = new Listnode; // 1.1
    tmp->data = data;              // 1.2
    tmp->next = next;              // 2.2
    return tmp; // Nachbedingung: Der Rückgabewert zeigt auf
}                                // einen neuen Knoten {d0,nx0}

```

durch den Aufruf

```

n0 = newListnode(d2, n0); // 2.1

```

ausgeführt. *n0* zeigt danach auf einen neu erzeugten Knoten, dessen Element *next* auf den Knoten zeigt, auf den das Argument für *next* zeigt. Falls das Argument für *next* den Wert 0 hat, zeigt der Funktionswert auf einen Knoten mit *next*==0.

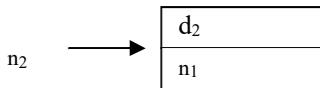
Das Ergebnis der ersten drei Ausführungen der Anweisung

```

first = newListnode(d1, first);

```

mit den Daten *d<sub>1</sub>*, *d<sub>2</sub>* usw., wobei der Wert von *first* zuerst 0 sein soll, ist in dem folgenden Ablaufprotokoll dargestellt. Dabei sind die Zeiger auf die von *newListnode* erzeugten Knoten mit *n<sub>1</sub>*, *n<sub>2</sub>* usw. bezeichnet, und ein Knoten, auf den ein solcher Zeiger zeigt, mit *->{d<sub>i</sub>,n<sub>j</sub>}*. Der Ausdruck *->{d<sub>2</sub>,n<sub>1</sub>}* in der Spalte *n<sub>2</sub>* ist also nichts anderes als eine Kurzschreibweise für



Die Werte in den Spalten  $n_1$ ,  $n_2$  usw. erhält man einfach durch Einsetzen der Argumente in die Nachbedingung von `newListNode`:

```

// first  n1      n2      n3
first = nullptr; // 0
first = newListNode(d1, first); // n1  ->{d1, 0}
first = newListNode(d2, first); // n2  ->{d2, n1}
first = newListNode(d3, first); // n3  ->{d3, n2}
  
```

Dieses Ablaufprotokoll illustriert, wie der erste dieser Aufrufe einen ersten Knoten mit `next==0` erzeugt, auf den `first` dann zeigt, und wie jeder weitere Aufruf einen neuen Knoten am Anfang in die verkettete Liste einhängt, auf die `first` zeigt. Mit vollständiger Induktion kann man zeigen, dass das allgemein gilt.

Die Funktionsweise von `newListNode` beruht insbesondere darauf, dass eine mit `new` erzeugte Variable bis zum Aufruf von `delete` existiert. Im Unterschied zu einer gewöhnlichen Variablen wird ihr Speicherplatz nicht mit dem Verlassen des Blocks wieder freigegeben, in dem sie erzeugt wurde.

- Deshalb existiert die Variable `*tmp`, die mit

```
Listnode* tmp = new Listnode;
```

erzeugt wurde, auch noch nach dem Verlassen der Funktion `newListNode`.

- Der Zeiger `tmp` ist dagegen eine „gewöhnliche“ lokale Variable, deren Speicherplatz mit dem Verlassen des Blocks wieder freigegeben wird. Da der Wert von `tmp` dem Element `next` des Funktionswerts zugewiesen wird, kann man die lokal erzeugte Variable `*tmp` über den Funktionswert auch außerhalb der Funktion verwenden, in der sie erzeugt wurde.

Listen, bei denen neue Elemente am Anfang eingehängt werden, bezeichnet man auch als „**Last-in-first-out**“-Listen (**LIFO**), da das zuletzt eingefügte Element am Anfang steht. Eine LIFO-Liste erhält man mit einem Zeiger `first`, der am Anfang den Wert 0 hat, und wiederholte Aufrufe der Funktion `newListNode`:

```

ListNode* first = nullptr;

void LIFOInsert(const T& data)
{
    first = newListNode(data, first);
}
  
```

Um alle Elemente einer **Liste** zu **durchlaufen**, kann man sich mit einer Hilfsvariablen `tmp` vom Anfang bis zum Ende durchhangeln:

```

void showList(Listnode* start)
{ // Gibt alle Daten der Liste ab der Position start aus
  Listnode* tmp = start;
  while (tmp != nullptr)
  {
    cout << tmp->data << endl;
    tmp = tmp->next;
  }
}

```

Da *start* als Wertparameter übergeben wird, kann man auch *start* als Laufvariable verwenden. Wäre *start* ein Referenzparameter, würde das Argument verändert:

```

while (start != nullptr)
{
  cout << start->data << " ";
  start = start->next;
}

```

Anstelle einer *while*-Schleife kann man auch eine *for*-Schleife verwenden:

```

for (Listnode* tmp = start; tmp != nullptr; tmp = tmp->next)
  cout << tmp->data << " ";

```

Durch diese Schleifen werden die Listenelemente in der Reihenfolge ausgegeben, in der sie sich in der Liste befinden. Falls sie durch eine Funktion wie *LIFOInsert* immer am Anfang eingehängt werden, werden sie in der umgekehrten Reihenfolge ausgegeben, in der sie eingehängt wurden.

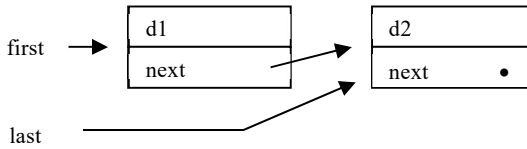
Einen Zeiger auf den ersten Knoten mit den Daten *x* erhält man mit der Funktion *findLinear*. Falls kein solcher Knoten gefunden wird, ist der Funktionswert *nullptr*:

```

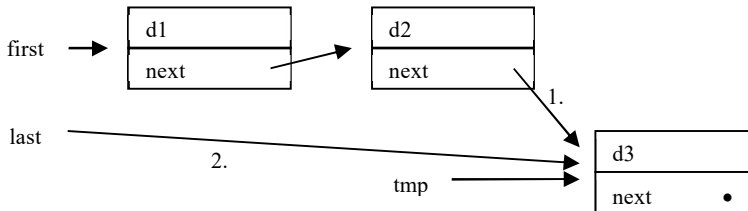
Listnode* findLinear(Listnode* start, const T& x)
{
  Listnode* found = nullptr;
  Listnode* tmp = start;
  while (tmp != nullptr && found == nullptr)
  {
    if (tmp->data == x) found = tmp;
    tmp = tmp->next;
  }
  return found;
}

```

Oft will man die Knoten einer Liste nicht in der umgekehrten Reihenfolge durchlaufen, in der sie eingefügt wurden, sondern in derselben. Das kann man dadurch erreichen, dass man einen neuen Knoten immer **am Ende** der Liste **einhängt**. Damit man sich dann aber nicht bei jedem Einfügen zeitaufwendig bis zum Ende der Liste durchhangeln muss, kann man einen **Zeiger** *last* einführen, der immer **auf das letzte Element** der Liste zeigt:



Ein neuer Knoten *\*tmp* soll dann der letzte Knoten in der Liste sein:



Das wird dadurch erreicht, dass man sein Element *next* auf 0 setzt:

```
Listnode* tmp = newListnode(data, nullptr);
```

In eine nichtleere Liste (*last!=0*) wird der neue Knoten dann durch

```
last->next = tmp;    // 1.
```

nach dem bisherigen letzten Element eingehängt. Falls die Liste dagegen leer ist (*last==0*), ist der neue Knoten der erste in der Liste:

```
first = tmp;
```

Mit

```
last = tmp;          // 2.
```

zeigt *last* dann auf den neuen letzten Knoten. Diese Anweisungen werden durch die folgende Funktion zusammengefasst:

```
Listnode* first = nullptr;
Listnode* last = nullptr;

void insertLastListnode(const T& data)
{ // Erzeugt einen neuen Listen-Knoten und fügt diesen
  // nach last ein. last zeigt anschließend auf den
  // letzten und first auf den ersten Knoten der Liste.
  Listnode* tmp = newListnode(data, nullptr); // tmp->{d0,0}
  if (last == nullptr) first = tmp;
  else last->next = tmp;    // 1.
  last = tmp;              // 2.
}
```

```

// Nachbedingung: Bezeichnet man den Wert von last vor
// dem Aufruf dieser Funktion mit  $l_0$ , gilt
// Fall I,  $l_0 == 0$ :  $first == tmp$  &&  $last == tmp$ 
// Fall II,  $l_0 != 0$ :  $l_0 \rightarrow next == tmp$  &&  $last == tmp$ 
}

```

Beim ersten Aufruf dieser Funktion gilt  $last == 0$ , was zur Ausführung des *then*-Zweigs der *if*-Anweisung und zu der als Fall I bezeichneten Nachbedingung führt. Bei jedem weiteren Aufruf gilt  $last != 0$ . Dann wird der *else*-Zweig ausgeführt, und es gilt die als Fall II bezeichnete Nachbedingung.

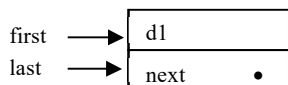
Das Ergebnis der ersten drei Ausführungen der Anweisung

```
insertLastListNode( $d_i$ );
```

mit den Daten  $d_1, d_2$  usw. ist in dem folgenden Ablaufprotokoll dargestellt. Dabei sind die Zeiger auf die in *insertLastListNode* erzeugten Knoten wieder wie im letzten Ablaufprotokoll mit  $n_1, n_2$  usw. bezeichnet, und ein Knoten, auf den ein solcher Zeiger zeigt, mit  $\rightarrow\{d_i, n_j\}$ . Die Werte in den Spalten  $n_1, n_2$  usw. erhält man durch Einsetzen der Argumente in die Nachbedingung von *insertLastListNode*:

|                         | <i>first</i> | <i>last</i> | $n_1$                          | $n_2$                    | $n_3$ |
|-------------------------|--------------|-------------|--------------------------------|--------------------------|-------|
| <i>first</i> = nullptr; | //           | 0           |                                |                          |       |
| <i>last</i> = nullptr;  | //           | 0           |                                |                          |       |
| insertLastLn( $d_1$ );  | //           | $n_1$       | $n_1 \rightarrow \{d_1, 0\}$   |                          |       |
| insertLastLn( $d_2$ );  | //           | $n_2$       | $n_2 \rightarrow \{d_1, n_2\}$ | $\rightarrow \{d_2, 0\}$ |       |
| insertLastLn( $d_3$ );  | //           | $n_3$       | $\rightarrow \{d_2, n_3\}$     | $\rightarrow \{d_3, 0\}$ |       |

Das entspricht nach dem ersten Aufruf der Konstellation

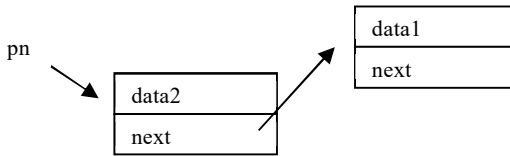


und nach dem zweiten und dritten Aufruf den oben dargestellten Konstellationen. Offensichtlich hängt ein Aufruf von *insertLastListNode* einen neuen Knoten auch in eine Liste mit  $n$  Elementen am Ende ein.

Eine Liste, bei der Knoten am Ende eingehängt und am Anfang entnommen werden, bezeichnet man auch als „**First-in-first-out**“-Liste (**FIFO**) oder als **Queue**. FIFO-Listen werden oft zur Simulation von Warteschlangen verwendet. Solche Warteschlangen können sich bilden, wenn Ereignisse in der Reihenfolge ihres Eintreffens bearbeitet werden (Fahrkartenausgabe, Bankschalter, Kasse in einem Supermarkt usw.).

Um den Knoten, auf den ein Zeiger *pn* zeigt, aus einer Liste zu entfernen

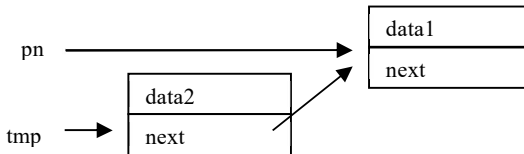




hängt man diesen Knoten einfach mit einer Anweisung wie

```
pn = pn->next;
```

aus der Liste aus:



Den vom ausgehängten Knoten belegten Speicher gibt man wie in *eraseListnode* mit *delete* wieder frei. Dazu muss man den Zeiger auf den Knoten vor dem Aushängen speichern:

```

void eraseListnode(Listnode*& pn)
{ // entfernt *p aus der Liste
  if (pn != 0) // falls pn==0, nichts machen oder Fehlermeldung
  {
    Listnode* tmp = pn;
    pn = pn->next;
    delete tmp;
  }
}

```

Beim Aufruf von *eraseListnode* muss das Argument der Zeiger im Listenknoten davor sein, damit dieser Zeiger anschließend auf das neue nächste Element zeigt. Diesen Zeiger kann man in einer einfach verketteten Liste nur durch eine Suche vom Anfang aus bestimmen, was relativ aufwendig ist. Deswegen verwendet man *eraseListnode* am besten nur in einer doppelt verketteten Liste, in der jeder Knoten auch einen Zeiger auf das vorherige Element enthält (siehe Aufgabe 2 h).

Alle Knoten einer verketteten Liste können durch eine Funktion wie *clearList* ausgehängt und gelöscht werden. Falls ein Zeiger *last* auf das letzte Element zeigen soll, muss *last* auf 0 gesetzt werden.

```

void clearList()
{ // löscht alle Knoten der Liste
  while (first != 0) eraseListnode(first);
  last = 0;
}

```

Dieser Abschnitt sollte nur einen ersten Einblick in den Aufbau und die Arbeit mit verketteten Listen geben. Dabei hat sich insbesondere gezeigt, dass **verkettete Listen** eine Alternative zu **Arrays** sein können, wenn ein Container zur Speicherung von Daten benötigt wird. **Vergleichen** wir zum Schluss die wichtigsten Vor- und Nachteile dieser beiden Alternativen. Diese Vor- und Nachteile gelten dann auch für die in Abschnitt 11.1 vorgestellten Container **vector** und **list** der C++-Standardbibliothek, die mit dynamisch erzeugten Arrays und doppelt verketteten Listen implementiert sind:

- Die Größe eines **C-Arrays** bzw. eines `std::array` muss zum Zeitpunkt der Kompilation festgelegt werden. Wenn man zu diesem Zeitpunkt aber noch nicht weiß, wie viele Daten zur Laufzeit anfallen, reserviert man eventuell zu viel oder zu wenig.
- Bei einem **dynamisch erzeugten Array** kann man mit Funktionen wie *ReAllocate* (siehe Abschnitt 6.5.4) bei Bedarf auch noch weiteren Speicher reservieren. Wenn man einen **Zeiger** `p` auf eine Position in einem dynamischen Array hat und die Speicherbereiche mit einer Funktion wie *ReAllocate* verschoben werden, ist `p` anschließend **ungültig**. Bei einer verketteten Liste werden die Elemente dagegen nie verschoben. Ein Zeiger auf einen Listenknoten wird nur ungültig, wenn der Knoten gelöscht wird.
- Für eine mit *new* erzeugte Variable (wie z.B. ein Knoten einer Liste) ist neben dem Speicherplatz für die eigentlichen „Nutzdaten“ noch **Speicherplatz für die Adresse** (im Zeiger) notwendig. Speichert man eine Folge von kleinen Datensätzen (z.B. einzelne Zeichen) in einer verketteten Liste, kann das mit einem beträchtlichen Overhead verbunden sein. Die Adresse eines Arrayelements wird dagegen über den Index berechnet und belegt keinen Speicherplatz.
- Der **Zugriff auf das n-te Element** eines Arrays ist einfach über den Index möglich. Da man auf das n-te Element einer verketteten Liste in der Regel keinen direkten Zugriff hat, muss man sich zu diesem meist relativ zeitaufwendig durchhangeln.
- Will man in eine **sortierte Folge von Daten** neue Elemente einfügen bzw. entfernen, ohne die Sortierfolge zu zerstören, muss man in einer verketteten Liste nur die entsprechenden Zeiger umhängen. In einem Array müssen dagegen alle folgenden Elemente verschoben werden.

Offensichtlich kann man nicht generell sagen, dass einer dieser Container besser ist als der andere. Vielmehr muss man die Vor- und Nachteile in jedem Einzelfall abwägen.

Normalerweise brauchen und sollen Sie (außer in den folgenden Übungsaufgaben) keine eigenen verketteten Listen und dynamischen Arrays schreiben. Die Containerklassen **list** und **vector** der C++-Standardbibliothek sind für die allermeisten Anwendungen besser geeignet als selbstgestrickte Listen und Arrays. Da sich die wesentlichen Unterschiede zwischen diesen Containerklassen aus den zugrundeliegenden Datenstrukturen ergeben, ist ein Grundverständnis dieser Datenstrukturen wichtig, auch wenn sie nicht selbst geschrieben werden sollen.

### Aufgabe 6.8

Falls diese Aufgaben im Rahmen einer Gruppe (z.B. in einer Vorlesung) bearbeitet werden, können einzelne Teilaufgaben auch auf verschiedene Teilnehmer verteilt werden. Die

Lösungen der einzelnen Teilaufgaben sollen dann in einem gemeinsamen Projekt zusammen funktionieren.

Der Aufwand, diese Funktionen mit Werten zu testen, die von einem Benutzer über die Konsole eingegeben werden, ist relativ groß. Deshalb reicht es aus, diese Funktionen mit hartkodierten Werten aufzurufen. Nach einem Aufruf von *pushFront(1)*, *pushFront(2)* und *pushFront(3)* müssen dann mit *showList* die Werte 1, 2 und 3 angezeigt werden.

1. Ein Programm soll *int*-Werte in eine verkettete Liste einhängen. Die beiden Zeiger *first* und *last* sollen bei einer leeren Liste den Wert *nullptr* haben und bei einer nicht leeren Liste immer auf den ersten und letzten Knoten der Liste zeigen. Schreiben Sie die folgenden Funktionen und rufen Sie diese auf. Sie können sich dazu an den Beispielen im Text orientieren.
  - a) ***pushFront*** soll einen neuen Knoten mit den als Parameter übergebenen Daten am Anfang in die Liste einhängen. Diese Funktion soll von einer Funktion mit dem Namen *Am Anfang in Liste einfügen* aufgerufen werden. Die Argumente für *pushFront* können hartkodiert angegeben werden.
  - b) ***showList*** soll die Daten der Liste ausgeben.
  - c) Schreiben Sie ein Ablaufprotokoll für 4 Aufrufe der Funktion ***pushFront*** (z.B. mit den Argumenten "10", "11", "12" und "13"). Geben Sie eine Beziehung an, die nach jedem Aufruf dieser Funktion gilt.
  - d) ***findLinear*** soll ab einer Startposition (ein als Parameter übergebener Zeiger auf einen Knoten) nach dem ersten Knoten der Liste mit den als Parameter übergebenen Daten suchen. Falls ein solcher Knoten existiert, soll ein Zeiger auf ihn zurückgegeben werden und andernfalls der Wert 0. Diese Funktion soll in einer Funktion mit dem Namen ***Linear\_suchen*** aufgerufen werden und alle *int*-Werte der Liste ausgeben, die gleich dem Argument *Linear\_suchen* sind.
  - e) ***pushBack*** soll einen neuen Knoten mit den als Parameter übergebenen Daten am Ende der Liste einhängen. Diese Funktion soll von einer Funktion mit dem Namen *Am Ende einfügen* aufgerufen werden. Die Argumente für *pushBack* können hartkodiert eingegeben werden. Diese Funktion soll auch dann funktionieren, wenn *pushBack* und *pushFront* in einer beliebigen Reihenfolge aufgerufen werden.
  - f) ***insertSorted*** soll einen neuen Knoten mit den als Parameter übergebenen Daten so in eine sortierte verkettete Liste einhängen, dass die Liste anschließend auch noch sortiert ist. Diese Funktion soll von einer Funktion mit dem Namen *Sortiert\_einfügen* aufgerufen werden. Die Argumente für *insertSorted* können hartkodiert eingegeben werden. Schreiben Sie dazu eine Funktion *findBefore*, die die Position des Knotens zurückgibt, an der der neue Knoten eingefügt werden soll.
  - g) ***clearList*** soll den gesamten von der verketteten Liste belegten Speicherplatz wieder freigeben.
  - h) Bei welcher dieser Funktionen zeigen *first* und *last* auch nach dem Aufruf auf den ersten und letzten Knoten der Liste, wenn sie vor dem Aufruf auf diese Knoten gezeigt haben?
2. Eine **doppelt verkettete Liste** besteht aus Knoten, die nicht nur einen Zeiger *next* auf den nächsten Knoten enthalten, sondern außerdem auch noch einen Zeiger *prev* auf den Knoten davor. Eine solche Liste kann man sowohl vorwärts als auch rückwärts durchlaufen. Die doppelt verkettete Liste in dieser Aufgabe soll durch die beiden Zeiger

*firstDll* und *lastDll* dargestellt werden, die immer auf den ersten bzw. letzten Knoten zeigen.

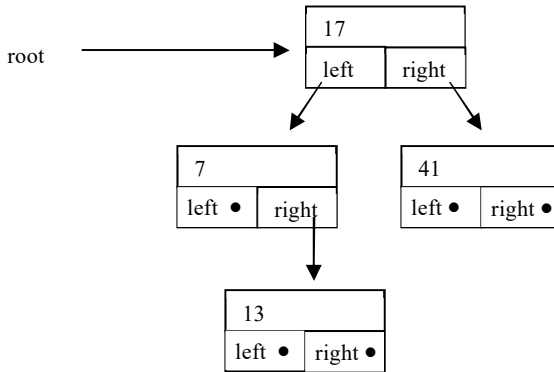
Schreiben Sie die folgenden Funktionen und rufen Sie diese auf. Sie können sich dazu an der letzten Aufgabe orientieren.

- a) Entwerfen Sie eine Datenstruktur ***DllListnode***, die einen Knoten einer doppelt verketteten Liste darstellt. Eine Funktion *newDllListnode* soll einen solchen Knoten mit den als Argument übergebenen Zeigern auf die Knoten *next* und *prev* sowie den Daten erzeugen und einen Zeiger auf diesen Knoten zurückgeben.
- b) Schreiben Sie eine Funktion ***pushFrontDll***, die einen Knoten mit den als Argument übergebenen Daten in eine doppelt verkettete Liste am Anfang einhängt.
- c) ***showDllForw*** soll die Daten der doppelt verketteten Liste anzeigen und dabei mit *firstDll* beginnen.
- d) ***showDllRev*** soll die Daten der doppelt verketteten Liste anzeigen und dabei mit *lastDll* beginnen.
- e) Stellen Sie das Ergebnis der ersten drei Aufrufe von ***pushFrontDll*** in einem Ablaufprotokoll dar.
- f) ***pushBackDll*** soll einen Knoten mit den als Argument übergebenen Daten am Ende in die verkettete Liste einhängen.
- g) Stellen Sie das Ergebnis der ersten drei Aufrufe von ***pushBackDll*** in einem Ablaufprotokoll dar.
- h) ***eraseDllListnode*** soll den ersten Knoten mit den als Parameter übergebenen Daten löschen, falls ein solcher Knoten existiert.
- i) ***clearList*** soll den gesamten von der verketteten Liste belegten Speicherplatz wieder freigeben. *firstDll* und *lastDll* sollen danach eine leere Liste darstellen.

## 6.9 Binärbäume $\Theta$

Auch diese Ausführungen über Binärbäume sollen nur einfache grundlegende Konzepte zeigen. Für praktische Anwendungen verwenden Sie besser assoziative Container (siehe Abschnitt 11.2) anstelle der Funktionen von hier.

**Baumstrukturen** werden aus Knoten aufgebaut, die einen Zeiger auf einen linken und rechten Teilbaum enthalten:



Ein Baumknoten kann durch einen Datentyp wie *Treenode* dargestellt werden:

```

typedef int T; // Datentyp der Nutzdaten

struct Treenode {
    T data;           // die Nutzdaten
    Treenode* left;
    Treenode* right;
};

```

Der Zeiger auf den obersten Knoten des Baums wird oft als *root* bezeichnet:

```
Treenode* root = nullptr;
```

Die Funktion *newTreenode* erzeugt einen Baumknoten mit den als Argument übergebenen Daten und Zeigern:

```

Treenode* newTreenode(const T& data, Treenode* left, Treenode* right)
{ // gibt einen Zeiger auf einen neuen Knoten zurück
    Treenode* tmp = new Treenode;
    tmp->data = data;
    tmp->left = left;
    tmp->right = right;
    return tmp;
}

```

Baumstrukturen sollen im Folgenden am Beispiel von **binären Suchbäumen** illustriert werden. Ein **binärer Suchbaum** ist eine Baumstruktur, in der

- ein Knoten einen Schlüsselwert hat, nach dem die Knoten im Baum angeordnet werden, sowie eventuell weitere Daten,
- jeder linke Teilbaum eines Knotens nur Schlüsselwerte enthält, die kleiner sind als der Schlüsselwert im Knoten, und
- jeder rechte Teilbaum nur Schlüsselwerte, die größer oder gleich dem Schlüsselwert im Knoten sind.

Beispiel: Der Baum von oben ist ein binärer Suchbaum, bei dem *data* als Schlüsselwert verwendet wird. Hängt man Knoten mit den folgenden Werten an den jeweils angegebenen Positionen ein, ist der Baum auch anschließend noch ein binärer Suchbaum:

5: an der Position *left* beim Knoten mit dem Wert 7

10: an der Position *left* beim Knoten mit dem Wert 13

15: an der Position *right* beim Knoten mit dem Wert 13

In einen binären Suchbaum mit der Wurzel *root* können Knoten mit der folgenden Funktion eingehängt werden:

```
void insertBinTreeNode(const T& x)
{
    if (root == nullptr)
        root = newTreeNode(x, nullptr, nullptr);
    else
    {
        Treenode* i = root;
        Treenode* p;
        while (i != nullptr)
        {
            p = i;
            if (x < i->data) i = i->left;
            else i = i->right;
        }
        if (x < p->data)
            p->left = newTreeNode(x, nullptr, nullptr);
        else p->right = newTreeNode(x, nullptr, nullptr);
    }
}
```

Mit einer Funktion wie *searchBinTree* kann man einen Knoten mit den als Argument übergebenen Daten finden:

```
Treenode* searchBinTree(const T& x)
{
    Treenode* result = nullptr;
    if (root != nullptr)
    {
        Treenode* i = root;
        while (i != nullptr && i->data != x)
        {
            if (x < i->data) i = i->left;
            else i = i->right;
        }
        if (i != nullptr && i->data == x)
            result = i;
    }
    return result;
}
```

Falls in einem Baum der linke und rechte Teilbaum eines Knotens jeweils etwa gleich tief ist, reduziert sich der Suchbereich mit jedem Schritt etwa um die Hälfte, so dass man wie beim binären Suchen logarithmische Suchzeiten erhält. Ein solcher Baum wird auch als **balancierter Baum** bezeichnet. Verbreitete balancierte Bäume sind die sogenannten Rot-Schwarz-Bäume, die oft in der C++-Standardbibliothek verwendet werden, und AVL-Bäume. Bei ihnen werden Knoten immer so eingefügt oder gelöscht, dass der Baum anschließend ausgeglichen ist.

Balancierte Binärbäume werden oft mit **rekursiven Funktionen** bearbeitet, da ihre Rekursionstiefe nicht sehr groß wird. Im Folgenden werden rekursive Varianten von einigen der iterativen Funktionen von oben vorgestellt. Alle diese Funktionen arbeiten nach dem gleichen Schema:

- wenn das Argument 0 ist, wird die Rekursion beendet und eine entsprechende Aktion ausgeführt (z.B. ein neuer Knoten eingefügt oder ein Wert zurückgegeben).
- bei einem von 0 verschiedenen Argument wird im linken oder rechten Teilbaum weitergesucht.

Die Funktion `insertBinTreeNode_rec` fügt wie die Funktion `insertBinTreeNode` einen neuen Knoten in den Binärbaum ein, dessen Wurzel als Argument übergeben wird:

```
void insertBinTreeNode_rec(Treenode*& b, const T& x)
{
    if (b == nullptr) b = newTreenode(x, nullptr, nullptr);
    else if (x < b->data) insertBinTreeNode_rec(b->left, x);
    else insertBinTreeNode_rec(b->right, x);
}
```

`traverseTree` **durchläuft alle Knoten** von links nach rechts (in sortierter Reihenfolge) und führt mit jedem Knoten die Anweisungen von `processTreenode` aus:

```
void processTreenode(Treenode* n)
{
    cout << n->data << endl;
}

void traverseTree_rec(Treenode* n)
{
    if (n != nullptr)
    {
        traverseTree_rec(n->left);
        processTreenode(n);
        traverseTree_rec(n->right);
    }
}
```

Die Funktion `searchBinTree_rec` sucht wie die Funktion `searchBinTree` einen Knoten mit den als Argument übergebenen Daten. Der Rückgabewert ist ein Zeiger auf diesen Knoten, wenn er gefunden wird, und andernfalls der Wert 0. Da der Binärbaum so aufgebaut ist, dass alle kleineren Schlüsselwerte links und alle größeren rechts vom aktuellen Knoten eingehängt

sind, braucht man nach einem kleineren Schlüssel nur links und nach einem größeren nur rechts weitersuchen:

```
Treenode* searchBinTree_rec(Treenode* n, const T& x)
{
    if (n == nullptr) return nullptr;
    else if (x == n->data) return n;
    else if (x < n->data) return searchBinTree_rec(n->left, x);
    else return searchBinTree_rec(n->right, x);
}
```

Falls der Baum ausgeglichen ist, halbiert sich der verbleibende Suchbereich mit jedem Rekursionsschritt. Der Knoten mit dem gesuchten Schlüsselwert wird in einem Baum mit  $n$  Knoten dann in etwa  $\log_2(n)$  Rekursionsschritten gefunden. Damit ist die Suche in einem binären Suchbaum ähnlich schnell wie die binäre Suche in einem sortierten Array.

Normalerweise brauchen und sollen Sie (außer in den folgenden Übungsaufgaben) keine eigenen Binärbäume schreiben. Die C++-**Standardbibliothek** enthält die Containerklassen *set*, *map*, *unordered\_map* usw. (siehe Abschnitt 11.2), die intern mit balancierten Binärbäumen (meist Rot-Schwarz-Bäume) implementiert sind und die für die allermeisten Anwendungen besser geeignet sind als selbstgestrickte Bäume. Da sich die wesentlichen Eigenschaften dieser Containerklassen aus den zugrundeliegenden Datenstrukturen ergeben, ist ein Grundverständnis dieser Datenstrukturen wichtig, auch wenn sie nicht selbst programmiert werden sollen. Für weitere Informationen zu Baumstrukturen wird auf die umfangreiche Literatur verwiesen (z.B. Cormen, 2001).

## Aufgabe 6.9

Bei den folgenden Aufgaben geht es nur um einige elementare Operationen und nicht um Performance. Deshalb muss der Baum nicht balanciert sein. Die assoziativen Container der Standardbibliothek in Abschnitt 11.2 ermöglichen einfachere und bessere Lösungen dieser Aufgaben.

Der Aufwand, diese Funktionen mit Werten zu testen, die von einem Benutzer über die Konsole eingegeben werden, ist relativ groß. Deshalb reicht es aus, diese Funktionen mit hartkodierten Werten aufzurufen.

1. Eine typische Anwendung von balancierten Binärbäumen ist ein **Informationssystem**, das zu einem eindeutigen Schlüsselbegriff eine zugehörige Information findet, z.B. den Preis zu einer Artikelnummer.
  - a) Entwerfen Sie eine Datenstruktur *Treenode*, die einen Knoten eines Baums mit einem Schlüssel *key* und zugehörigen Daten *data* (Datentyp z.B. *int* für beide) darstellt. Eine Funktion *newTreenode* soll einen solchen Knoten mit den als Argument übergebenen Zeigern auf die Unterbäume *left* und *right* sowie den Daten *key* und *data* erzeugen.
  - b) Schreiben Sie eine Funktion *insertBinTreenode*, die einen Knoten mit den als Argument übergebenen Daten in einen Binärbaum einhängt. Rufen Sie diese Funktion mit hartkodierten Argumenten für *key* und *data* auf. Die Knoten sollen im Baum entsprechend dem Schlüsselbegriff angeordnet werden.



- c) Schreiben Sie eine Funktion *searchBinTree*, die einen Zeiger auf einen Knoten mit dem als Argument übergebenen Schlüsselbegriff zurückgibt, wenn ein solcher Knoten gefunden wird, und andernfalls den Wert 0. Schreiben Sie unter Verwendung der Funktion *searchBinTree* eine Funktion

```
bool ValueToKey(const keyType& Key, dataType& Value)
```

Ihr Funktionswert soll *true* sein, wenn zum Argument für *Key* ein Knoten mit diesem Schlüsselwert gefunden wurde. Die zugehörigen Daten sollen dann als Argument für *Value* zurückgegeben werden. Falls kein passender Wert gefunden wird, soll der Funktionswert *false* sein.

Ergänzen Sie Ihre Lösung der Aufgaben b) und c) mit rekursiven Funktionen:

- d) Die Funktion *insertBinTreenode\_rec* soll wie *insertBinTreenode* einen Knoten mit den als Argument übergebenen Werten für *key* und *data* in einen Binärbaum einhängen.
- e) Die Funktion *traverseTree\_rec* soll für alle Knoten im Baum die Werte für *key* und *data* ausgeben.
- f) Die Funktion *searchBinTree\_rec* soll wie *searchBinTree* einen Zeiger auf einen Knoten mit dem als Argument übergebenen Schlüsselbegriff zurückgeben, wenn ein solcher Knoten gefunden wird, und andernfalls den Wert 0.

## 7 Überladene Funktionen und Operatoren

Mit Funktionen können Anweisungen unter einem eigenen Namen zusammengefasst und unter diesem Namen wieder aufgerufen werden. Dieses einfache Konzept hat viele Vorteile:

- **Mehrfach auszuführende Anweisungsfolgen** können über einen Namen aufgerufen werden. Da man sie nicht jedes Mal ins Programm schreiben muss, spart das Schreibarbeit und man erhält kürzere, übersichtlichere Programme.
- Wenn **Änderungen** einer solchen mehrfach auszuführenden Anweisungsfolge notwendig werden, muss man sie nur einmal durchführen.
- Eine Programmiersprache kann um selbst definierte, **problemangemessene Sprachelemente** erweitert werden.
- Bei der Suche nach der Lösung eines komplexeren Problems kann man systematisch die Strategie der **schrittweisen Verfeinerung** anwenden. Dabei versucht man die Lösung eines Gesamtproblems dadurch zu finden, dass man es in einfachere Teilprobleme zerlegt, die dann isoliert gelöst werden. Diese Vorgehensweise ist die wohl wichtigste allgemeine Lösungsstrategie.
- Wenn man die Lösung jedes Teilproblems in einer Funktion zusammenfasst, wird die **Struktur der Lösung explizit** im Programm dokumentiert.

Funktionen bieten aber mehr als nur die Zusammenfassungen von Anweisungen:

- Mit **Parametern** können die Anweisungen einer Funktion mit verschiedenen Werten bzw. Variablen durchgeführt werden.
- **Lokale Deklarationen** von Variablen usw. in einer Funktion sind von den Deklarationen in anderen Funktionen getrennt und damit auf die Lösung eines einzigen Teilproblems beschränkt.
- Default-Argumente können die Angabe von Argumenten ersparen.
- Verschiedene Funktionen mit hinreichend unterschiedlichen Parametern können denselben Namen haben (**überladene Funktionen**).
- Mit **Operatorfunktionen** können Operatoren für Operanden eines selbst definierten Datentyps definiert werden.

### 7.1 Inline-Funktionen Θ

Gibt man bei einer Funktionsdeklaration vor dem Namen der Funktion das Schlüsselwort **inline** an, bezeichnet man diese Funktion als **inline-Funktion**.

Die Kennzeichnung einer Funktion als *inline*-Funktion war **früher** vor allem ein Mittel zur Laufzeitoptimierung: Der Compiler soll den Aufruf einer *inline*-Funktion durch ihre Anweisungen zu ersetzen. Das wird auch als **inline Expansion** bezeichnet: Die Funktion soll nicht nur ein einziges Mal übersetzt und dieser übersetzte Code dann immer wieder aufgerufen werden, sondern jeder Aufruf soll durch die Anweisungen der Funktion ersetzt werden.

Beispiel: Mit einer Klasse des Typs

```
struct Mitarbeiter
{
    std::string Name;
    int IDNummer;
};
```

und der Funktion

```
inline bool less(Mitarbeiter x, Mitarbeiter y)
{
    return x.IDNummer < y.IDNummer;
}
```

kann der Compiler den Aufruf mit den Argumenten m1 und m2

```
if (less(m1, m2)) ...
```

so expandieren, dass er durch die Anweisungen der Funktion ersetzt wird:

```
if (m1.IDNummer < m2.IDNummer) ...
```

Für einen Programmierer ist es nicht einfach abzuschätzen, ob eine *inline*-Angabe Vorteile hat:

- Der Laufzeitvorteil ergibt sich vor allem daraus, dass der Aufwand für die Übergabe der Parameter auf dem Stack gespart wird. Dieser Vorteil ist aber nur bei kleinen Funktionen spürbar, die häufig aufgerufen werden. Bei Funktionen, bei denen die Ausführung der Anweisungen länger dauert, wirkt er sich kaum aus.
- Eine *inline*-Expansion kann auch Nachteile haben: Falls die Expansion zu mehr Code führt als ein Aufruf, wird die Exe-Datei größer. Bei einer kleinen Funktion kann der Code bei einer Expansion aber auch kleiner sein als der für die Übergabe der Parameter auf dem Stack.
- Die Kennzeichnung einer Funktion mit *inline* muss nicht dazu führen, dass sie inline expandiert wird. Da es Funktionen gibt (z.B. rekursive oder komplex verschachtelte), die nicht inline expandiert werden können, lässt der C++-Standard ausdrücklich zu, dass der Compiler den Aufruf einer *inline*-Funktion nicht expandiert.

Moderne Compiler verfügen über ausgefeilte Optimierungsstrategien, nach denen sie selbstständig entscheiden können, ob eine inline Expansion vorteilhaft ist oder nicht. Deshalb gibt es heute nur noch selten einen Grund, eine Funktion zur Laufzeitoptimierung als *inline*-Funktion zur deklarieren.

In Visual Studio kann man die Expansion von *inline*-Funktionen über *Projekt|Eigenschaften|Konfigurationseigenschaften|C/C++|Optimierung|Inlinefunktionserweiterung* steuern. In der Standard-Einstellung werden

- mit der bei einer Release-Konfiguration gesetzten Optimierungseinstellung `/O2` auch Funktionen expandiert, die nicht mit *inline* gekennzeichnet sind, wenn der Compiler das als optimaler betrachtet.
- bei einer Debug-Konfiguration auch mit *inline* gekennzeichnete Funktionen nicht expandiert, damit sie bei einer schrittweisen Ausführung mit dem Quelltext übereinstimmen.

Bei modernen Compilern besteht also keine Veranlassung, die Laufzeit eines Programms durch die Angabe *inline* zu optimieren. Vielmehr werden *inline*-Funktionen dann verwendet, wenn man eine Funktion in einer Header-Datei definieren und nicht nur deklarieren will. Wenn die Header-Datei dann mit `#include` in mehrere cpp-Dateien (Übersetzungseinheiten) eines Projekts aufgenommen wird, betrachten der Compiler bzw. Linker alle Definitionen der Funktion als dieselbe Funktion (one definition rule).

Beispiel: Die linke und die rechte Spalte zeigen den Unterschied, wie Funktionen definiert werden, die mit und ohne *inline* über eine Header-Datei zur Verfügung gestellt werden:

|                                                                                 |                                                                                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <pre>utils1.h // mit inline inline int plus1(int x) {     return x + 1; }</pre> | <pre>utils2.h // ohne inline int plus1(int x); // nur der Prototyp</pre>                           |
| <pre>utils1.cpp // nicht notwendig</pre>                                        | <pre>utils2.cpp // die Definition #include "utils2.h" int plus1(int x) {     return x + 1; }</pre> |
| <pre>use_utils1.cpp #include "utils1.h" int x1 = plus1(1);</pre>                | <pre>use_utils2.cpp #include "utils2.h" int x1 = plus1(1);</pre>                                   |

Die Datei `utils1.h` kann mit `#include` in beliebig viele cpp-Dateien eines Projekts eingebunden werden. Alle Definitionen der Funktion *plus1* in den verschiedenen Übersetzungseinheiten werden dann als eine einzige Funktion betrachtet.

Entfernt man in `utils1.h` *inline*, erhält man eine Fehlermeldung des Linkers, wenn `utils1.h` mit `#include` in mehrere cpp-Dateien eingebunden wird.

Will man eine Funktion, die keine *inline*-Funktion ist, in mehreren cpp-Dateien verwenden, darf man sie wie in der rechten Spalte in einer Headerdatei nur deklarieren. Ihre Definition muss in einer cpp-Datei enthalten sein.

Der Compiler betrachtet auch

*constexpr*-Funktionen und  
Elementfunktionen, die in der Klasse definiert werden

als *inline*-Funktionen, unabhängig davon, ob sie mit *inline* gekennzeichnet werden oder nicht. Deshalb können auch solche Funktionen und ganze Klassen mit ihren Elementfunktionen in einer Header-Datei definiert werden. Es ist nicht notwendig, diese wie in *utils2* auf eine Header- und *cpp*-Datei zu verteilen.

Der Grund für die unterschiedliche Behandlung von *inline*-Funktionen ist, dass die *inline*-Expansion auf dem Quelltext basiert: Ein *inline*-Funktion wird bei jedem ihrer Aufrufe übersetzt. Dazu benötigt der Compiler ihren Quelltext. Eine nicht mit *inline* gekennzeichnete Funktion wird dagegen bei ihrer Definition übersetzt. Eine Funktion, die bereits kompiliert in einer *obj*-Datei enthalten ist, kann nicht mehr *inline* expandiert werden. Wenn eine Header-Datei dann aber mit *#include* in mehrere *cpp*-Dateien aufgenommen wird, führt das zu doppelten Definitionen derselben Funktion. Solche doppelten Definitionen werden dann ohne *inline* als Fehler betrachtet. Mit *inline* werden sie dagegen als Definition derselben Funktion und nicht als Fehler behandelt. Diese unterschiedliche Behandlung von doppelten Definitionen ist die wesentliche Bedeutung von *inline*.

Die Definition von Funktionen in Header-Dateien wie in *utils1.h* ist mit etwas längeren Kompilationszeiten verbunden, da bei jeder Kompilation alle Funktionen neu übersetzt werden müssen. Dieser Nachteil war bei älteren Compilern oft gravierend. Bei modernen Compilern ist er aber oft tragbar. Dem steht bei einer Vorgehensweise wie in *utils2.h* der Nachteil entgegen, dass die Signatur in der *.h* und in der *.cpp*-Datei identisch sein muss. Deshalb muss man jeder Änderung der Parameterliste auch identisch in die andere Datei übernehmen. Diese Redundanz kann bei vielen Funktionen aufwendig und lästig sein.

## 7.2 Überladene Funktionen

Der Name einer Funktion sollte immer so gewählt werden, dass er ihre Aufgabe klar zum Ausdruck bringt. Mit der Möglichkeit, verschiedenen Funktionen denselben Namen zu geben (**überladene Funktionen**), ist das auch dann möglich, wenn verschiedene Funktionen dieselbe Aufgabe haben. Die verschiedenen überladenen Funktionen werden dann durch ihre Parameterlisten unterschieden, die hinreichend unterschiedlich sein müssen.

Beispiel: In der Programmiersprache C steht zur Bestimmung des Absolutbetrags ( $-x$  für  $x < 0$ , sonst  $x$ ) einer *int*-Zahl die Funktion

```
int abs(int x); // in der Datei „include\stdlib.h“
```

zur Verfügung. In der Umgangssprache (zumindest der mathematischen) wird der Name *abs* aber nicht nur für den Absolutbetrag von *int*-Werten verwendet, sondern unabhängig vom Datentyp auch für den von Gleitkommawerten, komplexen Zahlen usw. Da in C alle Funktionen verschiedene Namen haben müssen und der Name *abs* bereits vergeben war, mussten für die anderen Varianten dieser Funktion andere Namen gewählt werden. Für die *double*-Variante wurde der Name *fabs* gewählt, der die Aufgabe dieser Funktion kaum noch erkennen lässt:

```
double fabs(double x); // in der Datei „include\math.h“
```

Hier kommt der Anfangsbuchstabe *f* noch aus der Zeit, als der Standard-Gleitkommatyp *float* war. Falls man diese Funktion nicht kennt, kann es sehr mühsam sein, sie zu finden, insbesondere wenn man die *double* Version unter dem Namen *dabs* sucht.

Die *abs*-Funktionen sind nicht das einzige Beispiel. Die C-Funktionen aus *string.h* (z.B. *strcpy*) wurden irgendwann einmal um die *wide-char*-Funktionen ergänzt, die mit *w* beginnen (z.B. *wstrcpy*), beide um die Versionen mit maximal *n* Zeichen (z.B. *strncpy* und *wcsncpy*), und alle diese die *secure*-Versionen (z.B. *strcpy\_s*, *wstrcpy\_s*, *strncpy\_s* und *wcsncpy\_s*). Alle diese Funktionen machen im Wesentlichen dasselbe, nur immer ein wenig anders.

In C++ kann derselbe Name für verschiedene Funktionen mit verschiedenen Parameterlisten verwendet werden. Der Compiler entscheidet dann beim Aufruf einer solchen Funktion anhand des Datentyps der Argumente, welche Funktion aufgerufen wird. Eine solche mehrfache Verwendung desselben Namens für verschiedene Funktionen bezeichnet man als **Überladen von Funktionsnamen**.

Überladene Funktionen sind **sinnvoll** und angemessen, wenn für verschiedene Funktionen derselbe Name zutreffend ist, und diese Funktionen unterschiedliche Parametertypen haben. In Programmiersprachen, die keine überladenen Funktionen kennen, muss man solche Namen durch zusätzliche Angaben „künstlich“ unterscheiden. Diese Namen beschreiben dann die Funktion oft nicht mehr treffend.

In C++ werden überladene Funktionen oft verwendet:

- Die meisten mathematischen Funktionen sind für die Datentypen *float*, *double* und *long double* überladen. Dazu muss man diese über *cmath* und nicht über *math.h* einbinden:

```
#include <cmath> // nicht: #include <math.h>
using namespace std;
```

- Da die Konstruktoren einer Klasse (siehe Abschnitt 8.1.5) dadurch charakterisiert sind, dass sie alle denselben Namen wie die Klasse haben, ermöglichen überladene Funktionen verschiedene Konstruktoren.
- Alle Operatorfunktionen (siehe Abschnitt 7.3) für einen Operator haben denselben Namen.

Durch die folgenden beiden Definitionen werden zwei verschiedene Funktionen definiert, die beide den Namen *f* haben:

```
int f(int x) { return x*x; }
double f(double x) { return x + 1; }
```

Die nächsten beiden Funktionsaufrufe führen dann zum Aufruf der im Kommentar angegebenen Funktion, da es zu jedem Argumenttyp eine Funktion mit diesem Parametertyp gibt:

```
s = f(1);    // Aufruf von f(int)
s = f(1.0); // Aufruf von f(double)
```

Falls eine überladene Funktion aber mit einem Argument eines anderen Datentyps aufgerufen wird, stellt sich die Frage, ob überhaupt eine dieser Funktionen aufgerufen wird, und wenn ja, welche:

```
s = f(1.0f); // Wird float in double oder int konvertiert?
```

Die Regeln, nach denen eine überladene Funktion ausgewählt wird, folgen in Abschnitt 7.2.2.

Eine einzige Funktion mit **Default-Argumenten** ist oft eine **Alternative** zu verschiedenen überladenen Funktionen (z.B. wenn alle überladenen Varianten mit derselben Parameterliste beginnen). Dann hat eine einzige Funktion mit Default-Argumenten den Vorteil, dass alle Varianten in einer einzigen Funktion enthalten sind. Überladene Funktionen sind dagegen verschiedene Funktionen, die an verschiedenen Stellen im Quelltext stehen, und bei denen die Gefahr besteht, dass sie nach einer Überarbeitung nicht mehr konsistent sind.

### 7.2.1 Funktionen, die nicht überladen werden können

Damit der Compiler verschiedene überladene Funktionen unterscheiden kann, müssen sie verschiedene Parameterlisten haben. In den folgenden Fällen können Funktionen nicht überladen werden, und der Compiler erzeugt eine Fehlermeldung:

1. Falls die Parameter nur unterschiedlich aussehen, aber vom Compiler in denselben Typ konvertiert werden. Einige Beispiele:
  - Da ein Name für ein Array in einen Zeiger auf das erste Element konvertiert wird, hat für den Compiler ein eindimensionaler Arrayparameter denselben Datentyp wie ein Zeiger des Elementtyps. Deshalb führt die zweite Definition zu einer Fehlermeldung des Compilers

```
int f(int x[]) { return x[0]; }
int f(int* x) { return x[3]; } // Fehler: Für die Funktion
//                          existiert bereits ein Funktionsrumpf
```

- Wenn sich die Parameter nur durch *const* oder *volatile* auf der „äußersten Ebene des Datentyps“ unterscheiden, sind sie für den Compiler gleich. Deshalb haben die folgenden Funktionen denselben Datentyp:

```
int f(int x) { return x*x; }
int f(const int x) { return x + 1; } //Fehler: Für die ...
```

Wenn solche Angaben dagegen wie in „Zeiger auf const T“ im Inneren der verbalen Beschreibung des Datentyps des Parameters „enthalten“ sind, werden die Datentypen dagegen unterschieden. Deswegen sind die folgenden Funktionen verschieden und damit zulässig:

```

void f(int& i) {}
void f(const int& i) {}
void g(int* i) {}
void g(const int* i) {}

```

2. Falls sich nur der Rückgabetyt unterscheidet. Der Compiler kann nach den beiden Definitionen

```

int f(int x) { return x*x; }
double f(int x) { return x + 1; } // Fehler: Redeklaration
                                   // von 'f(int)' mit anderem Typ

```

nicht entscheiden, welche dieser Funktionen er hier aufrufen soll:

```
double x = f(3);
```

3. Zwei Parameterlisten, die sich nur in ihren Default-Argumenten unterscheiden, sind gleichwertig. Nach den beiden Definitionen

```

int f() { return 1; }
int f(int x = 1) { return x*x; }

```

kann der Compiler nicht entscheiden, welche Funktion er hier aufrufen soll:

```
f(); // Fehler: Mehrdeutigkeit zwischen 'f()' und 'f(int)'
```

### 7.2.2 Regeln für die Auswahl einer passenden Funktion

Beim Aufruf einer überladenen Funktion sucht der Compiler nach einer **am besten passenden Funktion**. Als Ergebnis dieser Suche gibt es drei Möglichkeiten:

- Es wird keine solche Funktion gefunden, und der Compiler erzeugt eine Fehlermeldung.
- Es wird genau eine solche Funktion gefunden, die dann aufgerufen wird.
- Es wird mehr als eine solche Funktion gefunden. Dann ist der Funktionsaufruf mehrdeutig und der Compiler erzeugt eine Fehlermeldung.

Die Entscheidung, welche Funktion am besten zu einem Funktionsaufruf passt, erfolgt nach einem umfangreichen Regelwerk des C++-Standards. Die wichtigsten dieser **Regeln für Funktionen mit einem einzigen Parameter** sind unter den Punkten 1 - 5 zusammengefasst. Da von diesen Regeln in den meisten Anwendungen nur die ersten drei von Bedeutung sind, und die ersten beiden einfach sind, ist dieses Regelwerk doch recht überschaubar.

Die Nummerierung dieser Regeln definiert ihre **Rangfolge**. Die erste Regel, nach der ein Funktionsaufruf zu einer Funktionsdefinition passt, legt fest, welche Funktion aufgerufen wird. Falls nach dieser ersten Regel mehrere Funktionen passen, kann der Aufruf mehrdeutig sein (Compilerfehler). Weitere Regeln, die hier nicht aufgeführt sind, können aber auch eine eindeutige Auflösung ermöglichen.



1. **Exakt passende Funktion:** Das Argument hat denselben Datentyp wie der Parameter. Dabei werden auch Array- und Zeigertypen sowie Funktionen und Funktionszeiger als gleich betrachtet.

Beispiel: Nach den Funktionsdefinitionen

```
void f(char* s) { };
void f(const char* s) { };
void f(double g(double)) { }
```

führen die folgenden Aufrufe zum Aufruf der jeweils im Kommentar angegebenen Funktion:

```
const char s[20] = "123";
f(s);           // Aufruf von f(const char*)
f("Hallo");    // Aufruf von f(const char*)
f(sin);        // Aufruf von f(double f(double))
```

Eine Variable passt zu einem konstanten oder nichtkonstanten Referenzparameter (siehe Abschnitt 7.4.3) und einem Wertparameter desselben Typs. Sie passt besser zu einem Referenz- oder Wertparameter als zu einem konstanten Referenzparameter. Eine Konstante (dazu gehört auch ein Literal), passt zu einem konstanten Referenzparameter und einem Wertparameter desselben Typs.

Beispiel: Falls nur eine dieser drei Funktionen

```
void f(int& s) { };
void f(const int& s) { };
void f(int s) { }
```

definiert ist, führt der Aufruf

```
int i;
f(i);
```

zum Aufruf dieser Funktion. Falls alle drei definiert sind, ist dieser Aufruf mehrdeutig, da diese beiden Funktionen

```
void f(int& s) { };
void f(int s) { };
```

passen. Zu einer Konstanten passen nur Wert- und konstante Referenzparameter. Falls die zweite und dritte Variante von `f` definiert sind, ist der nächste Aufruf mehrdeutig:

```
f(17);
```

Damit für einen Ausdruck `x` des Datentyps `T` ein Aufruf

```
f(x);
```

sowohl mit einer Konstanten als auch mit einer Variablen möglich ist, definiert man entweder eine Funktion *f* mit einem Wertparameter

```
void f(T p) { }
```

oder aber zwei überladene Funktionen mit einem konstanten und einem nicht konstanten Referenzparameter:

```
void f(const T& p) { };
void f(T& p) { };
```

Für selbstdefinierte Datentypen (wie z.B. Klassen) ohne benutzerdefinierte Konversionen ist das bereits die einzige Regel. Falls Ihre überladenen Funktionen nur selbstdefinierte Datentypen als Parameter verwenden, ist die Gefahr von Verwechslungen gering.

2. **Typangleichungen** für Wertparameter oder konstante Referenzparameter: Falls unter den überladenen Funktionen keine exakt passende, aber eine mit einem *int*-Parameter ist, und das Argument beim Aufruf einen der Datentypen *bool*, *char*, *signed char*, *unsigned char*, *short int* oder *unsigned short int* hat oder ein Aufzählungstyp ist, wird die Funktion mit dem *int*-Parameter aufgerufen. Das Argument wird dann durch eine ganzzahlige Typangleichung („integral promotion“) in *int* konvertiert. Entsprechend wird auch bei einer Funktion mit einem *double*-Parameter und einem *float*-Argument die *double*-Funktion aufgerufen.

Beispiel: Nach den Definitionen

```
void f(int x) { }
void f(unsigned char x) { }
void f(double x) { }
```

werden die folgenden Aufrufe wie angegeben aufgelöst:

```
short int si;
f(si);      // Aufruf von f(int)
f('c');    // Aufruf von f(int) - nicht f(unsigned char)
enum E { e1, e2 } e;
f(e);      // Aufruf von f(int)
f(3.14f);  // Aufruf von f(double)
```

3. **Standardkonversion** für Wertparameter oder konstante Referenzparameter: Der Datentyp des Arguments kann durch eine der folgenden Konversionen in den Datentyp des Parameters konvertiert werden:

- ein beliebiger arithmetischer Datentyp in einen beliebigen anderen arithmetischen Datentyp,
- der Wert 0 sowohl in einen Zeigertyp als auch in einen arithmetischen Datentyp,
- ein schwach typisierter Aufzählungstyp in einen beliebigen numerischen Datentyp,
- ein Zeiger auf eine abgeleitete Klasse in einen Zeiger auf eine Basisklasse (siehe Abschnitt 8.3.7),
- ein beliebiger Zeigertyp in den Datentyp *void\**.

Beispiel: Nach den Definitionen

```
void f(char* x) { }
void f(double x) { }
```

führen die folgenden Aufrufe alle zum Aufruf von *f(double)*:

```
f(true);
f('c');
f(1);
```

Da das Argument 0 sowohl zu einem Zeiger als auch zu einem arithmetischen Datentyp passt, ist der folgende Aufruf zweideutig:

```
f(0); // Fehler: Mehrdeutigkeit zwischen 'f(char*)' und 'f(double)'
```

Dagegen führt der folgende Aufruf zum Aufruf von *f(char\*)*:

```
char* p = 0;
f(p);
```

Obwohl die Datentypen *long* und *int* in 32-bit Visual C++ denselben Wertebereich haben, sind sie verschiedene Datentypen. Bei einem *int*-Parameter wird das Argument durch eine Typangleichung konvertiert, während bei einem *long*-Parameter eine Standardkonversion stattfindet. Deshalb ist mit den Definitionen der linken Spalte

```
void f(double x) { };      void f(double x) { };
void f(int x) { };         void f(long x) { };
```

der Aufruf

```
f(1);
```

eindeutig. Mit den Definitionen der rechten Spalte ist er dagegen mehrdeutig, weil der Wert 1 durch eine Standardkonversion sowohl in *double* als auch *long* konvertiert werden kann.

Das nächste Beispiel zeigt die Auflösung bei Funktionen mit Referenz- und Wertparametern desselben Typs und Argumenten eines konvertierbaren Typs:

Beispiel: Von den drei Funktionen

```
void f(int& s) { };
void f(const int& s) { };
void f(int s) { };
```

passen nur die letzten beiden zu einem Argument, das in den Parameter konvertiert werden kann. Da beide gleich gut zu einem konstanten Argument eines solchen Typs passen, ist der nächste Aufruf mehrdeutig:

```
const char c = 'x';
```

`f(c);`

4. **Benutzerdefinierte Konversion:** Das Argument kann durch eine benutzerdefinierte Konversion in den Parameter konvertiert werden. Solche Konversionen werden mit einem Konstruktor oder mit einem Konvertierungsoperator definiert (siehe die Abschnitte 8.2.9 und 8.2.10).
5. Das Argument passt zu einer Funktion mit einer unspezifizierten Anzahl von Argumenten. Solche Funktionen sollten aber vermieden werden.

Beispiel: Nach den Definitionen

```
void f(double x) { }
void f(...) { }
```

führt der folgende Ausdruck zum Aufruf von `f(...)`:

```
f("");
```

Bei **Funktionen mit mehreren Parametern** werden diese Regeln auf jeden Parameter angewandt. Wenn für einen Funktionsaufruf mehrere Funktionen in Frage kommen, wird diejenige aufgerufen, bei der

- jedes Argument genauso gut oder besser passt als bei allen anderen, und
- mindestens ein Argument besser passt als bei allen anderen.

Falls es keine passende Funktion oder mehrere solcher Funktionen gibt, erzeugt der Compiler eine Fehlermeldung.

Beispiel: Nach den beiden Definitionen

```
int f(int i, int j) { return i; } // f1
int f(double c, double i) { return i; } // f2
```

gibt es beim Aufruf

```
f('a', 1.1); // Fehler: Mehrdeutigkeit ..
```

keine am besten passende Funktion: 'a' passt besser zu *f1* und 1.1 passt besser zu *f2*. Dagegen gibt es bei dem Aufruf

```
f(1L, 1L); // Fehler: Mehrdeutigkeit ..
```

zwei am besten passende Funktionen: 1L passt sowohl zu *f1* als auch zu *f2*.

Angeichts der vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten von Argumenten und Parametern ist ein umfangreiches Regelwerk notwendig, damit sich verschiedene Compiler einheitlich verhalten. Das bedeutet aber nicht, dass man alle **diffizilen Feinheiten** dieser Regeln ausnutzen sollte. Vielmehr sollte man beim Entwurf der Parameterlisten immer darauf achten, die Gefahr von **Missverständnissen** zu minimieren.

## Aufgaben 7.2

1. a) Eine erste Version eines Programms soll zunächst die Funktion

```
int fkt(double d) { return 0; };
```

enthalten, die dann weiter hinten im Programm so aufgerufen wird:

```
int x = fkt(42);
```

Später wird das Programm dann unmittelbar nach der Definition der ersten Funktion durch

```
int fkt(int i) { return 1; };
```

ergänzt. Wie wirkt sich diese Änderung aus?

- b) Geben Sie eine Kategorie von Datentypen an, für die der Effekt von Aufgabe a) nicht auftreten kann.
2. Können die Funktionen unter a) bzw. b) durch eine Funktion mit Default-Argumenten ersetzt werden?

a) 

```
void f(string s, string format) {};  
void f(string s) {};  
void f() {};
```

b) 

```
void g(int n) {};  
void g(double d) {};  
void g(double d, string s) {};
```

- c) Eine Variable des Typs

```
struct Bruch {  
    int z, n; // z: Zähler, n: Nenner  
};
```

soll durch den Aufruf einer Funktion *initBruch* initialisiert werden. Beim Aufruf mit zwei Argumenten soll der Zähler den Wert des ersten Arguments erhalten und der Nenner den Wert des zweiten. Beim Aufruf mit einem Argument soll der Zähler diesen Wert erhalten und der Nenner den Wert 1.

Schreiben Sie *initBruch* einmal mit Default-Argumenten und einmal mit überladenen Funktionen.

- d) Falls die Alternative besteht: Sind Default-Argumente oder überladene Funktionen die bessere Wahl?
3. Eine Bibliothek soll für eine Funktion wie *sqrt* drei überladene Varianten mit *float*, *double* und *long double* Argumenten und Rückgabewerten wie

```
float sqrt(float x) {};
double sqrt(double x) {};
long double sqrt(long double x) {};
```

zur Verfügung. Welche der folgenden Aufrufe werden kompiliert?

```
double x1 = sqrt(1);
double x2 = sqrt(1.0);
double x3 = sqrt(1.01); // ein long double Argument
```

## 7.3 Überladene Operatoren mit globalen Operatorfunktionen

Die meisten Operatoren können durch eine sogenannte **Operatorfunktion** überladen werden. Durch eine Operatorfunktion wird dann der Operator für einen oder zwei Operanden eines selbst definierten Datentyps definiert. Der Name einer solchen Funktion setzt sich dabei aus dem Schlüsselwort *operator* und einem der folgenden Operatoren zusammen:

*operator-function-id:*  
operator operator

*operator:* one of

|     |        |       |          |    |    |     |    |     |   |
|-----|--------|-------|----------|----|----|-----|----|-----|---|
| new | delete | new[] | delete[] | () | [] | -   | >  | ->* | ~ |
| !   | +      | -     | *        | /  | %  | ^   | &  |     |   |
| =   | +=     | -=    | *=       | /= | %= | ^=  | &= | =   |   |
| ==  | !=     | <     | >        | <= | >= | <=> | && |     |   |
| <<  | >>     | <<=   | >>=      | ++ | -- | ,   |    |     |   |

Beispiel: Schon in Zusammenhang mit den Containerklassen der Standardbibliothek wurde erwähnt, dass die Funktion *sort* zum Sortieren den Operator „<“ verwendet. Sobald dieser Operator für einen Datentyp definiert ist, kann ein Container oder ein Array mit Elementen dieses Datentyps mit dieser Funktion sortiert werden.

```
#include <algorithm>
Kontobewegung a[10];
std::sort(a, a + 10);
```

Für zwei Operanden des Datentyps

```
struct Kontobewegung { int KontoNr; /* usw. */ };
```

kann man den Operator „<“ durch diese Operatorfunktion definieren:

```
bool operator<(const Kontobewegung& x, const Kontobewegung&
               y)
{
    return (x.KontoNr < y.KontoNr);
}
```

Nach dieser Definition kann man den Operator „<“ auf zwei Operanden des Datentyps *Kontobewegung* anwenden:

```
Kontobewegung k1, k2;
if (k1 < k2) // Aufruf von operator<(k1,k2)
```

Ein solcher Ausdruck wird dann als Aufruf der Funktion mit dem Namen „operator<“ ausgewertet, der der linke Operand als erstes und der rechte Operand als zweites Argument übergeben wird. Diese Funktion kann sogar unter diesem Namen aufgerufen werden. Allerdings ist diese umständliche Schreibweise nicht üblich:

```
if (operator<(k1, k2)) // umständlich
```

Ein durch eine Operatorfunktion definierter Operator hat **dieselbe Priorität, Assoziativität** und Anzahl von Operanden wie dieser Operator für einen vordefinierten Datentyp. Es ist nicht möglich, diese Eigenschaften zu verändern. Es ist auch nicht möglich, **andere Operatoren** als die hier aufgeführten zu definieren. Deshalb kann weder ein neuer Operator **\*\*** für die Potenzierung noch ein unärer Operator „/“ definiert werden. Da in dieser Liste die Operatoren

```
.  .*  ::  ?:
```

nicht enthalten sind, können diese nicht überladen werden. Bei den ersten drei Operatoren liegt das darin begründet, dass sie als Operanden einen Namen und nicht einen Ausdruck haben.

Es ist außerdem nicht möglich, die Bedeutung der Operatoren für die vordefinierten Datentypen zu verändern. Mindestens einer der Parameter einer Operatorfunktion muss einen selbst definierten Datentyp haben.

Eine Operatorfunktion kann sowohl als **globale Funktion** als auch als **Elementfunktion einer Klasse** definiert werden. Da Elementfunktionen erst in Abschnitt 8.1.1 vorgestellt werden, wird in diesem Abschnitt nur gezeigt, wie man globale Operatorfunktionen definiert. Allerdings können die Operatoren „=“ (Zuweisung), „()“ (Funktionsaufruf), „[]“ (Indexoperator) und „->“ (Zugriff auf ein Klassenelement) nicht mit globalen Funktionen überladen werden, sondern nur mit Elementfunktionen (siehe Abschnitt 8.2.4).

Ab C++20 muss man die Vergleichsoperatoren <, <=, >, >=, == und != nicht mehr einzeln überladen, sondern kann sie mit dem dreifachen Vergleichsoperator <=> (siehe Abschnitt 8.2.5) oft durch eine einzige Definition erzeugen lassen.

Überladene Operatoren sind **nicht nur für mathematische Operationen** geeignet. Ihre gängigen Symbole ermöglichen oft auch für andere Operationen kurze und prägnante Ausdrücke. So verwenden die **Iteratoren** der Containerklassen aus der Standardbibliothek unter anderem die folgenden Operatoren:

- Der Operator `++` rückt den Iterator auf das nächste Element im Container vor.
- Der Operator `--` setzt den Iterator auf die vorangehende Position.
- Der Operator `*` liefert das Element im Container, auf das der Iterator zeigt.

Diese Operatoren stehen bei den verschiedenen Containerklassen für völlig verschiedene Anweisungen. Da sie aber in allen Containern dieselbe Bedeutung haben, kann man sie in allen Containern mit derselben Syntax verwenden, ohne dass man sich um die Details der Implementierung kümmern muss. Diese einheitliche Schnittstelle der Iteratoren ist die Grundlage der Algorithmen der Standardbibliothek. Alle Algorithmen sind ausschließlich mit Hilfe von Iteratoren definiert.

Da die Operatoren der Iteratoren außerdem dieselben sind wie bei Zeigern und diese auch dort dieselbe Bedeutung haben, funktionieren alle Algorithmen der Standardbibliothek auch mit Datenstrukturen, die über Zeiger angesprochen werden. Da dazu auch Arrays gehören, funktionieren alle solchen Algorithmen auch mit Arrays.

### 7.3.1 Globale Operatorfunktionen

Das letzte Beispiel zeigt bereits das Schema, nach dem eine globale Operatorfunktion für einen **binären Operator** `@` definiert wird. Hier wird das Zeichen `@` als Symbol für einen der Operatoren von oben verwendet. Nach der Definition

```
T operator@(T1 p1, T2 p2) // @ steht für einen Operator
{ // T, T1 und T2 stehen für Datentypen
  return ...
}
```

kann der Operator `@` mit einem ersten Operanden des Typs `T1` und einem zweiten Operanden des Typs `T2` verwendet werden. Der Ausdruck

```
x @ y // Datentyp von x bzw. y: T1 bzw. T2
```

wird dann vom Compiler in einen Aufruf der Funktion

```
operator@(x, y)
```

übersetzt. Dabei wird der linke Operand als erstes und der rechte Operand als zweites Argument übergeben. Der Wert des Ausdrucks ist der Rückgabewert und hat den Datentyp `T`.

Entsprechend wird ein **unärer Operator** durch eine globale Funktion mit einem Parameter überladen. Für einen Operanden `x` ist der Wert des Ausdrucks

```
@x
```

der Rückgabewert

```
operator@(p1)
```

Die Operatoren



+ - \* &

können sowohl als unäre als auch als binäre Operatoren überladen werden. Die Anzahl der Operanden entscheidet dann wie bei einer überladenen Funktion darüber, welche Funktion aufgerufen wird.

Bei überladenen Operatoren gelten die **Identitäten** der Operatoren für die vordefinierten Datentypen **nicht automatisch**. Wenn für überladene Operatoren und beliebige Operanden  $x, y$  immer

$x += y$  und  $x = x + y$  bzw.  
 $++x$  und  $x + 1$

gleich sein soll, muss dies durch entsprechende Definitionen sichergestellt werden. Bei manchen Operatoren kann man diese Identitäten dadurch herstellen, dass man sie auf andere Operatoren zurückführt.

Wenn z.B. der Operator „==“ definiert ist, kann man den Operator „!=“ folgendermaßen durch diesen Operator definieren:

```
bool operator!=(const T& x, const T& y)
{
    return !(x == y);
}
```

Entsprechend lassen sich die Operatoren „>“, „>=“ und „<=“ auf den Operator „<“ zurückführen:

```
bool operator>(const T& x, const T& y)
{
    return y < x;
}

bool operator<=(const T& x, const T& y)
{
    return !(y < x);
}

bool operator>=(const T& x, const T& y)
{
    return !(x < y);
}
```

Diese Beispiele wurden mit leichten Änderungen aus der Datei der C++-Standardbibliothek übernommen, die man mit „#include <utility>“ erhält.

### Aufgaben 7.3.1

1. Auf den ersten Blick erscheint es vielleicht als naheliegend, mit dem Operator  $\wedge$  Potenzen zu realisieren, so dass  $x^n$  für  $x^n$  steht. Welcher Wert würde sich dabei für den folgenden Ausdruck ergeben?

$$x^n - 1$$

2. Eine rationale Zahl (ein Bruch im Sinne der Bruchrechnung) besteht aus einem ganzzahligen Zähler und einem Nenner und kann deshalb durch die folgende Klasse dargestellt werden:

```
struct Bruch {
    int z, n; // z: Zähler, n: Nenner
};
```

Die Bruchrechnung ist auf Rechnern nicht sehr verbreitet, da die Rechnungen leicht zu einem Überlauf führen. Sie ist aber ein einfaches Beispiel dafür, wie man überladene Operatoren definieren kann.

Zur Vereinfachung werden Brüche im Folgenden durch Wertepaare wie (1,2) dargestellt und nicht mit einem Bruchstrich wie in  $\frac{1}{2}$ .

- a) Zwei Brüche (pz,pn) und (qz,qn) sind gleich, wenn  $pz*qn == pn*qz$  gilt. Definieren Sie die Operatoren „==“ und „!=“ für Operanden des Datentyps *Bruch*. Stellen Sie sicher, dass zwischen diesen Operatoren die üblichen Beziehungen gelten.
- b) Der Bruch (pz,pn) ist kleiner als (qz,qn), wenn  $pz*qn < pn*qz$  gilt. Definieren Sie die Operatoren „<“, „>“, „<=“ und „>=“ für Operanden des Datentyps *Bruch*. Stellen Sie sicher, dass zwischen diesen Operatoren die üblichen Beziehungen gelten.
- c) Definieren Sie Operatorfunktionen für die folgenden Operationen.

$$\begin{aligned} (pz,pn) + (qz,qn) &= (pz*qn + pn*qz, pn*qn) \\ (pz,pn) - (qz,qn) &= (pz*qn - pn*qz, pn*qn) \\ (pz,pn) * (qz,qn) &= (pz*qz, pn*qn) \\ (pz,pn) / (qz,qn) &= (pz*qn, pn*qz) \end{aligned}$$

Bei diesen Operationen sollen der Zähler und Nenner gekürzt werden, indem man beide durch den größten gemeinsamen Teiler dividiert. Dazu kann die Funktion *ggT* (siehe auch Aufgabe 2.4.11, 1. c) verwendet werden:

```
int ggT(int a, int b)
{
    int x = a, y = b;
    while (y != 0)
    {
        int r = x%y;
        x = y;
        y = r;
    }
}
```

```
    return x; // ggT(a,b)==x;
}
```

- d) Sie können diese Operatoren testen, indem Sie die Werte vergleichen, die sich bei der geometrischen Reihe

$$1 + p + p^2 + \dots + p^N = (p^{N+1} - 1) / (p - 1) \quad // \quad p = z/n$$

durch Aufsummieren (linke Seite) und mit der Summenformel (rechte Seite) ergeben. Sie können diese Werte außerdem mit dem Bruch vergleichen, den man beim Einsetzen von  $z/n$  für  $p$  in die Summenformel erhält.

### 7.3.2 Die Ein- und Ausgabe von selbst definierten Datentypen

Die Ein- und Ausgabeoperatoren „>>“ und „<<“ können auch für selbst definierte Datentypen definiert werden. Dazu schreibt man Operatorfunktionen für diese Operatoren nach dem folgenden Schema:

```
std::ostream& operator<<(std::ostream& f, const T& k)
{
    // T ist ein selbst definierter Datentyp
    return f << // Ausgabe der Elemente von k
}

std::istream& operator >> (std::istream& f, T& k)
{
    // T ist ein selbst definierter Datentyp
    f >> // Einlesen der Elemente von T
        // zum selbst definierten Datentyp zusammensetzen
    return f;
}
```

Da sich alle selbst definierten Datentypen letztendlich aus vordefinierten Datentypen zusammensetzen, für die die Operatoren „<<“ und „>>“ vordefiniert sind, kann man diese Elemente nach den Ausdrücken „f<<“ bzw. „f>>“ angeben.

Bei diesen Operatorfunktionen haben der Funktionswert und der erste Parameter denselben Datentyp (zum Thema Referenzen als Rückgabotyp siehe Abschnitt 7.4.4). Deshalb kann man den Funktionswert einer solchen Funktion wieder als erstes Argument in diese Funktion einsetzen:

```
operator<<(operator<<(operator<<(f, x), y), z);
```

Dieser verschachtelte Funktionsaufruf ist aber nur eine andere Schreibweise für den Ausdruck

```
((f << x) << y) << z)
```

und dieser Ausdruck ist gleichwertig zu

```
f << x << y << z
```

da die Shift-Operatoren `<<` und `>>` linksassoziativ sind. Deswegen kann man diese Operatoren wie bei den vordefinierten Datentypen verketteten, wenn man sie nach dem Schema von oben definiert.

Ähnlich wie im Beispiel in Abschnitt 4.3.4 kann man z.B. die Operatorfunktion für die Ausgabe von Variablen des Datentyps *Kontobewegung* definieren:

```
std::ostream& operator<<(std::ostream& f, const Kontobewegung& k)
{ // #include <iomanip>, #include <fstream>
  using namespace std;
  return f << setw(4) << k.KontoNr << " " << left << setw(20)
    << k.NameInhaber << right << setw(2) << k.Datum.Tag << "."
    << setw(2) << k.Datum.Monat << "." << setw(2)
    << k.Datum.Jahr << " " << k.BewArt << setprecision(8)
    << double(k.Betrag) << endl;
}
```

Mit dieser Funktion kann man eine Variable dieses Datentyps folgendermaßen in einen *ostream* (z.B. einen *ofstream* oder einen *ostream*) schreiben:

```
std::ofstream f("c:\\test\\kb.dat");
f << k; // k eine Variable des Datentyps Kontobewegung
```

Den Eingabeoperator für eine *Kontobewegung* kann man so z.B. definieren:

```
std::istream& operator >> (std::istream& f, Kontobewegung& k)
{
  char Punkt1, Punkt2;
  std::string Vorname, Nachname;
  f >> k.KontoNr >> Nachname >> Vorname >> k.Datum.Tag >> Punkt1
    >> k.Datum.Monat >> Punkt2 >> k.Datum.Jahr >> k.BewArt
    >> k.Betrag;
  k.NameInhaber = Vorname + Nachname;
  return f;
}
```

## Aufgaben 7.3.2

1. Definieren Sie für die Klasse *Bruch* aus Aufgabe 7.3.1 überladene Operatoren `<<` und `>>`, so dass ein *Bruch* sowohl aus einem *istream* eingelesen als auch über einen *ostream* (z.B. *cin* oder *cout*) ausgegeben werden kann.
- a) Verwenden Sie diese Operatoren, um Brüche in eine Datei zu schreiben bzw. aus einer Datei zu lesen (siehe Abschnitt 12.4). Eine Datei kann zum Schreiben über eine Variable der Klasse *ofstream* und zum Lesen über eine Variable der Klasse *ifstream* angesprochen werden. Diese Klassen stehen im Namensbereich *std* zur Verfügung nach

```
#include <fstream>
```

- b) Verwenden Sie diese Operatoren in zwei Funktionen *BruchToStr* und *StrToBruch*, die einen *Bruch* über einen *ostream* (siehe Abschnitt 3.4.2) in einen *string* der Standardbibliothek von C++ umwandeln bzw. über einen *istream* einen *Bruch* aus einem *string* einlesen.

### 7.3.3 *new* und *delete* überladen

Obwohl *new* und *delete* keine Operatorsymbole wie + oder < sind, zählen sie zu den Operatoren und können überladen werden. Für einige spezielle Varianten ist

```
#include <new>
```

notwendig. Eine solche Operatorfunktion kann sowohl global auch als in einer Klasse definiert werden. Für eine **globale Überladung** verwendet man im einfachsten Fall die Signatur

```
void* operator new(std::size_t sz);
void operator delete(void* ptr) noexcept;
```

Beim Aufruf von *new* bzw. *delete* mit einem beliebigen Datentyp T werden dann diese überladenen Operatorfunktion aufgerufen:

```
T* p = new T; // führt zum Aufruf von operator new(sizeof(T))
delete p;     // führt zum Aufruf von operator delete(p)
```

Die in Abschnitt 6.7 beschriebenen Techniken zum Auffinden von Memory Leaks basieren auf überladenen *new*- und *delete*-Operatoren.

Die vordefinierten Operatoren *new* und *delete* reservieren den Speicher mit *malloc* und geben ihn mit *free* wieder frei, wie in

```
void* operator new(std::size_t sz)
{ // nicht in einem namespace zulässig
    void* ptr = std::malloc(sz);
    cout << " ::new size = " << sz << " Adresse=" << unsigned
                                                int(ptr) << endl;

    if (ptr)
        return ptr;
    else
        throw std::bad_alloc{};
}

void operator delete(void* ptr) noexcept
{ // nicht in einem namespace zulässig
    cout << " ::delete Adresse " << unsigned int(ptr) << endl;
    std::free(ptr);
}
```

Der einzige Unterschied zu den vordefinierten Operatoren *new* und *delete* sind die Anweisungen mit *cout*, die den Aufruf protokollieren, und die Adresse *ptr* des reservierten Speichers ausgeben. Mit

```

class C { int a, b, c; };

void test_new()
{
    cout << "new int;-----" << endl;
    int* pi = new int;
    cout << "new double;-----" << endl;
    double* pd = new double;
    cout << "new C();-----" << endl;
    C* pc = new C();
    cout << "string s('abc');-----" << endl;
    string s("abc");
    cout << "new vector<string> v{ '1','ab' };-----" << endl;
    vector<string> v{ "1", "ab" };
}

```

erhält man beim Aufruf von *test\_new* Meldungen wie

```

new int;-----
::new size = 4 Adresse=1130358128
new double;-----
::new size = 8 Adresse=1130359248
new C();-----
::new size = 12 Adresse=1130359728
string s('abc');-----
::new size = 16 Adresse=1130359808
new vector<string> v{ '1','ab' };-----
::new size = 16 Adresse=1130359968
::new size = 16 Adresse=1130360048
::new size = 16 Adresse=1130361328
::new size = 80 Adresse=1130262064
::new size = 16 Adresse=1130360208
::new size = 16 Adresse=1130360128
::delete Adresse 1130360048
::delete Adresse 1130359968
-----Ende test_new();-----
::delete Adresse 1130360208
::delete Adresse 1130360128
::delete Adresse 1130262064
::delete Adresse 1130361328
::delete Adresse 1130359808

```

Hier sieht man,

- wie die mit *new* reservierten Adressen mit *delete* wieder freigegeben werden: Für einige Adressen wurden diese mit Linien verbunden (für alle wäre das etwas unübersichtlich geworden).
- dass ein einziges *new* zu weiteren internen Aufrufen von *new* führen kann
- dass ein *vector* für alle internen *new*-Aufrufe automatisch ein *delete* aufruft
- wie man durch ein solches Protokoll nachprüfen kann, ob das *delete* zu einem *new* vergessen wurde. Die mühselige manuelle Suche über die Adressen wird in Abschnitt 6.7.2 durch eine automatische Zuordnung vereinfacht.

Analog werden die globalen Operatoren *new[]* und *delete[]* mit

```
void* operator new[](std::size_t count);
void operator delete[](void* ptr) noexcept;
```

überladen. Diese werden dann durch die folgenden Anweisungen

```
int n = 10;
T* a = new T[n]; // führt zum Aufruf von operator new[](sizeof(T)*n
                  + overhead)
delete[] a;      // führt zum Aufruf von operator delete[](p)
```

aufgerufen. Falls man die Aufrufe von *new[]* und *delete[]* aber nur protokollieren will, muss man diese nicht überladen, da sie *new* und *delete* aufrufen.

Beispiel: Auch ohne eine Definition der überladenen Operatoren *new[]* und *delete[]* wird der Aufruf

```
int* a=new int[10];
delete[] a;
```

protokolliert, wenn die Operatoren *new* und *delete* wie oben überladen sind:

```
::new size = 40 Adresse=62956192
::delete Adresse 62956192
```

Definiert man die Operatorfunktionen *new*, *delete*, *new[]* und *delete[]* dagegen **als Elementfunktionen in einer Klasse C**, werden sie nur aufgerufen, wenn Objekte der Klasse C mit *new* bzw. *new[]* angelegt oder mit *delete* bzw. *delete[]* freigegeben werden.

Beispiel: Nimmt man die überladenen Operatoren *new* und *delete* in die Klasse C auf,

```
class C
{
    int a, b, c;
public:
    void* operator new(std::size_t sz)
    {
        void* ptr = std::malloc(sz);
        cout << " C::new size = " << sz << " Adresse=" <<
                unsigned int(ptr) << endl;

        if (ptr)
            return ptr;
        else
            throw std::bad_alloc{};
    }
}
```

```

void operator delete(void* ptr) noexcept
{
    cout << "  C::delete Adresse " << unsigned int(ptr) << endl;
    std::free(ptr);
}
};

```

erhält man bei der Ausführung der Anweisungen

```

C* pc = new C;
C* pa = new C[3];
delete pc;
delete[] pa;

```

Meldungen wie

```

C::new size = 12 Adresse=1857546784
C::new size = 36 Adresse=1857518880
C::delete Adresse 1857546784
C::delete Adresse 1857518880

```

Die Operatoren *new* und *delete* können mit weiteren Argumenten aufgerufen werden, wenn dafür entsprechende Operatorfunktionen definiert sind. Diese werden auch als **placement new und placement delete**-Operatoren bezeichnet. Sie existieren in zwei Varianten: Die vordefinierten Operatoren

```

void* operator new(std::size_t count, void* ptr);
void* operator new[](std::size_t count, void* ptr);

```

sind die sogenannten **non-allocating** Varianten. Sie reservieren keinen dynamischen Speicher, sondern legen ein Objekt an der als *ptr* übergebenen Adresse an. Dieses placement *new* wird normalerweise nur in speziellen technischen Anwendungen eingesetzt und hat unter Windows nur wenige Anwendungen. Es wird aufgerufen, wenn *new* ein Argument übergeben wird, das den Datentyp *void\** hat.

Beispiel: Bei manchen technischen Anwendungen für Mikrocontroller müssen Variable an speziellen Hardware-Adressen angelegt werden. Hier wird die Syntax durch eine Adresse auf dem Stack illustriert:

```

char stack_mem[sizeof(T)]; // reserviere Speicher auf dem
                             stack
T* p = new(stack_mem) T;    // lege ein Objekt an die
                             Adresse stack_mem
p->~T(); // für mit non-allocating placement new angelegte
         // Objekte, die muss der Destruktor explizit
         // aufgerufen werden

```

Auch die sogenannten **benutzerdefinierten placement new** Varianten werden in der Praxis nur selten benötigt. Sie ermöglichen den Aufruf von *new* mit anderen Argumenten. Dabei hat der Operator *new* einen zweiten Parameter mit einem anderen Datentyp als *void\**. Darauf



können auf beliebige weitere Parameter folgen. Dieser Operator wird dann aufgerufen, wenn die Argumente zu den Parametern ab dem zweiten Parameter passen.

Beispiel: In Abschnitt 6.7.2 wird der placement new Operator

```
void* operator new(std::size_t sz, char const* file, int
                                     line)
{
    return new_track(sz, file, line);
}
```

verwendet, um für jeden Aufruf von *new* zu protokollieren, in welcher Datei und in welcher Zeilennummer er erfolgt ist. Diese überladene Variante wird dann durch eine Anweisung wie

```
double* pd = new("c:\\Projekt\\MeinHeader.h", 123) double;
```

aufgerufen.

## 7.4 Referenztypen, Wert- und Referenzparameter

Im Folgenden werden die wichtigsten Sachverhalte über Parameter, Referenztypen und Rückgabetyphen zusammenfasst.

### 7.4.1 Wertparameter

Ein Parameter, dessen Datentyp kein Referenztyp ist, wird auch als **Wertparameter** bezeichnet. Ein Wertparameter ist in der Funktion eine lokale Variable, die auf dem **Stack** angelegt und beim Aufruf der Funktion mit dem Wert (daher der Name) des entsprechenden Arguments initialisiert wird. Da die lokale Variable einen anderen Speicherbereich als das Argument belegt, wird das Argument bei einem Aufruf der Funktion nicht verändert.

Beispiel: Nach dem Aufruf der Funktion

```
void f(int x) // x ist ein Wertparameter
{
    x = 2;
}
```

in

```
int y = 3;
f(y);
```

hat die Variable *y* (wie schon vor dem Aufruf von *f*) unverändert den Wert 3, da nur der in *f* lokalen Variablen *x* der Wert 2 zugewiesen wird, nicht jedoch der globalen Variablen *y*.

Als **Argument** kann für einen Wertparameter ein beliebiger Ausdruck (eine Konstante, Variable usw.) eingesetzt werden, für den eine **Konversion** in den Datentyp des Parameters definiert ist. Die Funktion *f* aus dem letzten Beispiel kann deswegen auch mit einem konstanten Gleitkommawert aufgerufen werden.

Da Wertparameter auf dem Stack angelegt werden, müssen die Argumente auf den Stack kopiert werden. Da dieses Kopieren bei großen Parametern mit einem gewissen Zeitaufwand verbunden sein kann, sollte man große Wertparameter nur mit Bedacht verwenden.

**Konstante Wertparameter** sind nur selten sinnvoll. Da sich die Veränderung eines Wertparameters in einer Funktion nur auf die lokale Kopie der Daten auswirkt, hat das Argument nach dem Aufruf der Funktion denselben Wert wie vorher, und zwar unabhängig davon, ob der Parameter mit *const* deklariert wurde oder nicht. Einer der wenigen Vorteile von konstanten Wertparametern ist, dass eine Verwechslung von „*=*“ und „*==*“ wie in „*if (x=17)*“ durch den Compiler entdeckt wird.

## 7.4.2 Referenztypen

Eine **Referenz** ist ein anderer Name für eine Variable oder Konstante.

Man erhält eine Referenz durch eine Definition nach dem Schema

`T& r`

Dabei ist *T* ein Datentyp, der kein Referenztyp sein darf, und *r* ein Bezeichner. Der Datentyp der **Referenz** *r* ist dann ein **Referenztyp**, der auch als „Referenz auf *T*“ oder als „*T*&“ bezeichnet wird. Wenn das Zeichen & wie hier nach einem Datentyp steht, ist es nicht wie vor einer Variablen der Adressoperator.

Um sicherzustellen, dass eine Referenz ein anderer Name für eine Variable oder Konstante ist, muss sie bei ihrer Definition mit der anderen Variablen initialisiert werden.

```
T& r = v; // die Referenz r wird mit der Variablen oder Konstanten v
           initialisiert
```

Die Referenz *r* ist dann ein anderer Name für die Variable oder Konstante *v*. Für eine Referenz des Typs *T*& muss *v* den Datentyp *T* oder *T*& oder den einer von *T* abgeleiteten Klasse haben. Die Regeln für konstante Referenzen (siehe Abschnitt 7.4.5) sind nicht ganz so streng.

Beispiel: Durch die zweite Zeile wird *r* ein anderer Name für die Variable *i*:

```
int i = 0;
int& r = i; // r ist eine Referenz auf i. Der
           // Datentyp von r ist "Referenz auf int"
```

Falls eine Referenz nicht initialisiert wird, ist das ein Fehler:

```
int& r1; // error: Verweise müssen initialisiert
        // werden
```

Auch nicht passende Datentypen werden vom Compiler bemängelt:

```
double& d = i; // error: 'int' kann nicht in
               // 'double&' konvertiert werden
```

Eine konstante Referenz kann dagegen auch mit einem anderen Datentyp initialisiert werden. Eine implizite Konversion reicht aus:

```
const double& d = i; // Mit konstanten Referenzen geht das
```

Referenzen auf Referenzen gibt es nicht. Eine Referenz kann aber mit einer Referenz initialisiert werden:

```
int&& rr1 = r; // error
int& rr = r; // rr ist eine weitere Referenz auf i
```

Alle Operationen mit einer Referenz werden mit der Variablen ausgeführt, mit der sie initialisiert wurde.

Beispiel: Mit den Definitionen des letzten Beispiels erhält `i` in der nächsten Zeile den Wert 17, obwohl das aus dem Text nicht unmittelbar hervorgeht:

```
r = 17; // weist i den Wert 17 zu!
```

Offensichtlich kann die Verwendung von zwei verschiedenen Namen für eine Variable (Aliasing, siehe Abschnitt 6.2) zu unübersichtlichen Programmen führen. Da es nur selten einen Grund dafür gibt, sollte man auf **eine solche Anwendung** von Referenzvariablen **verzichten**.

Referenztypen sind aber **für Funktionsparameter sinnvoll** (siehe Abschnitt 2.4.5 und 7.4.3).

### 7.4.3 Referenzparameter

Wenn der Datentyp eines Parameters ein Referenztyp ist, wird der Parameter auch als **Referenzparameter** bezeichnet.

Bei einem Referenzparameter bedeutet die **Initialisierung** des Parameters mit einem Argument beim Aufruf der Funktion, dass der Parameter ein anderer Name für das Argument ist. Mit diesem Argument werden dann beim Aufruf der Funktion alle Anweisungen ausgeführt, die in der Funktionsdefinition mit dem Parameter ausgeführt werden. Diese Form der Initialisierung wird vom Compiler dadurch realisiert, dass die Adresse des Arguments auf dem Stack übergeben wird. Über diese Adresse wird dann das Argument angesprochen. Daraus ergeben sich die folgenden Unterschiede zu Wertparametern:

- Das **Argument** für einen **Referenzparameter** kann im Unterschied zu einem Wertparameter in der Funktion **verändert** werden. Ein Referenzparameter wird beim Aufruf der Funktion mit dem entsprechenden Argument initialisiert und ist dann in der Funktion ein anderer Name für das Argument. Alle Anweisungen mit dem Parameter erfolgen dann beim Aufruf mit dem Argument.

- Bei einem nicht konstanten Referenzparameter muss das Argument **denselben Datentyp** wie der Parameter haben und eine **Variable** sein. Bei Klassen kann der Datentyp des Arguments auch eine vom Datentyp des Parameters abgeleitete Klasse sein. Mit anderen Argumenten kann ein Referenzparameter nur initialisiert werden, wenn er konstant ist.
- Funktionsaufrufe mit Referenzparametern sind meist **schneller** als mit Wertparametern, da nur die Adresse des Arguments auf den Stack kopiert wird. Bei einem Wertparameter wird dagegen das ganze Argument kopiert.

Beispiel: Mit der Funktion

```
void f(int& x) // x ist ein Referenzparameter
{
    x = 2;
}
```

hat y nach der Ausführung von

```
int y = 3;
f(y);
```

den Wert 2, da die Anweisung x=2 direkt mit der globalen Variablen y und nicht mit einer in f lokalen Variablen x ausgeführt wird. Deswegen werden beim Aufruf der folgenden Funktion *vertausche* auch die Werte der beiden als Argument übergebenen Variablen vertauscht:

```
void vertausche(int& x, int& y)
{
    int h = x;
    x = y;
    y = h;
}
```

Der Compiler übergibt für einen Referenzparameter immer die Adresse des Arguments und dereferenziert diese in der Funktion automatisch. Insofern besteht kein Unterschied zu einem Parameter eines Zeigertyps. Da das Argument für einen Referenzparameter normalerweise eine gewöhnliche Variable ist, besteht keine Gefahr, dass diese auf nicht reservierten Speicher zeigt. Diese Gefahr ist bei Argumenten eines Zeigertyps wesentlich größer.

Für **verschiedene nicht konstante Referenzparameter** sollte man **nie dieselbe Variable** als **Argument** einsetzen, da diese sonst in der Funktion unter verschiedenen Namen angesprochen wird (Aliasing). Das kann zu unerwarteten Ergebnissen führen.

Beispiel: Auf den ersten Blick wird man nach einem Aufruf der Funktion

```
void g(int& a, int& b, int& c)
{
    c = a + b;
    c = c + a;
}
```

erwarten, dass das Argument für  $c$  den Wert  $a+b+a$  hat. Das trifft auch zu, wenn man sie mit verschiedenen Argumenten aufruft:

```
int x = 1, y = 2, z = 3;
g(x, y, z); // z = 4
```

Es gilt aber nicht, wenn man für verschiedene Parameter dasselbe Argument einsetzt:

```
int x = 1, y = 2, z = 3;
g(z, x, z); // z = 8 !!!
```

Mit konstanten Referenzparametern können solche Effekte nicht auftreten. Bei nicht konstanten Referenzparametern kann man sie vermeiden, indem man in der Funktion prüft, ob die Argumente verschiedene Variable sind. Das kann man feststellen, indem man die Adressen der Argumente vergleicht.

Beispiel: In der Funktion  $f$  werden die Fälle mit verschiedenen und gleichen Variablen als Argumente in verschiedenen Zweigen behandelt:

```
void f(T& x, T&y)
{
    if (&x != &y)
    {
        // Die Argumente für x und y sind verschieden,
    } // "normaler" Code
    else
    {
        // Die Argumente für x und y sind gleich,
    } // Code für aliasing
}
```

Den Aufruf einer Funktion mit **Referenzparametern** kann man in einem **Ablaufprotokoll** dadurch darstellen, dass man den Namen des Parameters durch den seines Arguments ersetzt.

Beispiel: Für die Anweisungen aus dem letzten Beispiel erhält man so das folgende Ablaufprotokoll. Die jeweiligen Argumente sind als Kommentar angegeben.

|                               | $x$ | $y$ | $z$     |
|-------------------------------|-----|-----|---------|
| $x = 1; y = 2; z = 3;$        | 1   | 2   | 3       |
| $g(x,y,z)$ // $a=x, b=y, c=z$ |     |     |         |
| $c = a+b;$ // $z=x+y$         |     |     | $1+2$   |
| $c = c+a;$ // $z=z+x$         |     |     | $1+2+1$ |
| $x = 1; y = 2; z = 3$         | 1   | 2   | 3       |
| $g(z,x,z)$ // $a=z, b=x, c=z$ |     |     |         |
| $c = a+b$ // $z = z+x$        |     |     | $3+1$   |
| $c = c+a;$ // $z = z+z$       |     |     | $4+4$   |

### 7.4.4 Referenzen als Rückgabetypen

Der **Rückgabety**p einer Funktion kann nicht nur ein Wertety, sondern auch ein **Referenz-**ty sein. Dann ist der Funktionswert ein anderer Name für den Ausdruck nach *return*:

```
int& f(int& i)
{
    i = i + 10;
    return i;
}
```

Der Aufruf einer solchen Funktion kann auf der linken Seite einer Zuweisung stehen.

```
int x = 0;
f(x) = 1; // x=1 und nicht etwa 10 oder 11
```

Offensichtlich hat eine Zuweisung an einen Funktionsaufruf nicht viel mit der üblichen Verwendung von Funktionen gemein und wird meist als verwirrend angesehen. Diese Zuweisung ist nur wegen dem Referenzzeichen & beim Rückgabety möglich. Entfernt man es wieder, ist sie nicht möglich.

Funktionswerte auf der linken Seite von Zuweisungen sind im Wesentlichen nur mit den Operatoren „\*“ (Dereferenzierung), „=“ (Zuweisung), „[“ (Indexoperator), den Ein- und Ausgabeoperatoren << bzw. >>, den kombinierten Zuweisungsoperatoren („+=“, „\*=“, „&=“ usw.) und den Präfixoperatoren ++ und – notwendig.

Beispiel: Der Indexoperator wie z.B. in

```
class MeinVector
{
    int* p = new int[100];
public:
    int& operator[](int index)
    {
        return p[index];
    }
};
```

wird oft auf der linken Seite einer Zuweisung verwendet:

```
MeinVector v;
v[1] = 17;
```

Da die Zuweisung an v[1] vom Compiler in den Aufruf der Operatorfunktion übersetzt wird, steht hier der Funktionsaufruf auf der linken Seite einer Zuweisung:

```
v.operator[](1) = 17;
```

Operatorfunktionen, die auf der linken Seite einer Zuweisung stehen können, sind aber nicht der einzige Einsatzbereich von Referenzrückgabety, da die Rückgabe eines Funktionswertes durch eine *return*-Anweisung **analog zur Parameterübergabe** behandelt wird:

- Falls der **Rückgabetyt keine Referenz** ist, wird der Ausdruck nach *return* in den Speicherbereich des Funktionswerts kopiert, so wie auch das Argument für einen Wertparameter bei einem Funktionsaufruf in die entsprechende lokale Variable kopiert wird.
- Wenn der **Rückgabetyt** dagegen **ein Referenztyp** ist, wird nur die Referenz (also die Adresse) zurückgegeben, wie beim Aufruf einer Funktion mit einem Referenzparameter.

Deshalb ist der Aufruf einer Funktion mit einem Referenzparameter schneller, wenn als Argument eine Funktion übergeben wird, die eine Referenz als Rückgabetyt hat.

Beispiel: Viele Elementfunktionen der Klassen aus der Standardbibliothek haben eine Referenz als Rückgabetyt, wie z.B. die Funktion

```
string& insert(const size_type Off, const char* const p)
```

der Klasse *string* (siehe Abschnitt 3.2). Übergibt man diese als Argument an eine Funktion mit einem Referenzparameter

```
size_type find(const string& Right, const size_type Off = 0)
```

wird der Aufwand für das Kopieren der Werte gespart:

```
std::string s = "abcx-y123", a = "xy";
size_t pos=s.find(a.insert(1, "-"));
```

Diese Optimierung wirkt sich vor allem dann aus, wenn eine Funktion mehrfach als Argument übergeben wird.

Beispiel: Da *g* einen Referenz-Rückgabetyt hat

```
T& g(T& x, int y) // T irgendein Datentyp
{
    ...
    return x;
}
```

wird bei dem **verschachtelten Aufruf**

```
g(g(g(f, x), y), z)
```

das erste Argument jedes Mal als Referenz übergeben.

Beispiele für solche Funktionen sind z.B. die Ein- und Ausgabeoperatoren (siehe Abschnitt 7.3.2). Der Ausdruck

```
cout << x << y << y;
```

wird vom Compiler wie der verschachtelte Aufruf behandelt:

```
operator<<(operator<<(operator<<(cout, x), y), z);
```

### 7.4.5 Konstante Referenzparameter

**Konstante Referenzparameter** können in der Funktion nicht verändert werden. Deshalb ist mit einem solchen Parameter wie mit einem Wertparameter sichergestellt und explizit dokumentiert, dass das Argument beim Aufruf der Funktion nicht verändert wird. Da nur die Adresse des Arguments auf den Stack kopiert wird, sind bei großen Parametern **Funktionsaufrufe mit Referenzparametern** deutlich **schneller** als solche mit Wertparametern. Konstante Referenzparameter verbinden also diesen Vorteil von Wertparametern mit der höheren Geschwindigkeit von Referenzparametern.

So wurden z.B. für 10'000'000 Aufrufe der Funktionen

```
const int Size = 10000; // 1, 16, 100
struct TBig {           // sizeof(TBig)=10000
    std::array<char, 1> s; // bzw. 16 oder 100 oder 10'000
};

int WertPar(TBig b)
{
    return b.s[0];
}

int ConstWertPar(const TBig b)
// dieselben Anweisungen wie WertPar

int Ref(TBig& b) // dieselben Anweisungen wie WertPar

int ConstRef(const TBig& b)
// dieselben Anweisungen wie WertPar

int Ptr(TBig* b)
{
    return b->s[0];
}
```

die folgenden Ausführungszeiten gemessen:

| Benchmarks Visual Studio 2019.5, Release /O2, x64, Laufzeit in Sekunden |           |           |           |              |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| 10 000 000 Aufrufe                                                      | Size=1    | Size=16   | Size=100  | Size =10 000 |
| <i>Wertepar, ConstWertepar</i>                                          | 0,02 Sek. | 0,02 Sek. | 0,03 Sek. | 1,7 Sek.     |
| <i>ConstRef, Ref, Ptr</i>                                               | 0,01 Sek. | 0,01 Sek. | 0,01 Sek. | 0,01 Sek.    |

Es empfiehlt sich deshalb, größere Parameter **immer** als **Referenzparameter** und nicht als Wertparameter zu übergeben, wenn das möglich ist. Aus diesem Grund werden die meisten größeren Parameter bei Bibliotheksfunktionen als Referenzparameter übergeben. Bei kleineren Parametern (bei vielen Compilern bis zu 16 Bytes) ist der Vorteil aber meist gering.

Im Unterschied zu einem Argument für einen nicht konstanten Referenzparameter muss ein **Argument** für einen **konstanten Referenzparameter** nicht denselben Datentyp wie der Parameter haben und auch keine Variable sein. Der Compiler erzeugt dann aus dem



Argument eine temporäre Variable vom Datentyp des Parameters und übergibt ihre Adresse an die Funktion. Falls man eine Funktion mit einem Referenzparameter sowohl mit Argumenten aufrufen will, die eine Variable oder eine Konstante sind, muss der Parameter ein konstanter Referenzparameter sein.

### Aufgaben 7.4

1. a) Wie das als Kommentar angegebene Ablaufprotokoll zeigt, vertauscht die Funktion

```
void vertausche1(int& x, int& y) // Thanks to Alex
{
    // x      y
    // x0     y0
    x = x + y; // x0+y0
    y = x - y; // (x0+y0)-y0=x0
    x = x - y; // (x0+y0)-x0=y0
} // x==y0 && y==x0
```

die Werte der Argumente, wenn sie mit verschiedenen Argumenten aufgerufen wird. Welches Ergebnis hat der Aufruf

```
int x = 17;
vertausche1(x, x);
```

Verwenden Sie dazu ein Ablaufprotokoll, falls Sie das Ergebnis nicht gleich sehen.

- b) Ändern Sie diese Funktion so ab, dass sie auch bei einem Aufruf mit zwei gleichen Argumenten das richtige Ergebnis liefert.
- c) Prüfen Sie, ob die Funktion

```
void vertausche(int& a, int& b)
{
    int h = a;
    a = b;
    b = h;
}
```

auch beim Aufruf mit zwei gleichen Variablen ein korrektes Ergebnis hat.

## 7.5 Reihenfolge der Auswertung von Ausdrücken seit C++17

Die Reihenfolge, in der die Teilausdrücke eines Ausdrucks ausgewertet werden, ist oft undefiniert. Diese Reihenfolge darf nicht mit der Assoziativität der Operatoren verwechselt werden.

Beispiel: Mit den Funktionen

```
std::string e;
int f() { e = e + "a"; return 1; }
int g() { e = e + "b"; return 2; }
int h() { e = e + "c"; return 3; }
```

ist die Auswertung des Ausdrucks

```
int x = f() + g() + h();
```

natürlich linksassoziativ. Deswegen erhält x in

```
int x = (f() + g()) + h();
```

immer den Wert 6.

Vor C++17 war aber nicht festgelegt, welchen Funktionsaufruf der Compiler zuerst auswertet. Deswegen war für e jeder Permutation von "a", "b" und "c" zulässig.

Diese Unbestimmtheit der Auswertungsreihenfolge von Teilausdrücken gilt für beliebige Ausdrücke und nicht nur für Funktionsaufrufe.

Beispiel: Für den Ausdruck, der i zugewiesen wird

```
int j = 0;
int i = (j + 1) * (j = 2); // (0+1)*2=2 oder (2+1)*2=6 ?
```

ist nicht definiert, ob zuerst (j+1) mit j=0 und dann (j=2) oder zuerst (j=2) und dann (j+1) berechnet wird. Verschiedene Versionen von Visual C++ hatten den Wert 6 und den Wert 2. Es ist also durchaus möglich, dass verschiedene Versionen eines Compilers verschiedene Werte ergeben.

Ausdrücke mit derart unbestimmten Werten lassen sich vermeiden, wenn man jede Variable, die in einem Ausdruck verändert wird, höchstens einmal verwendet.

Seit C++17 werden Postfix-Ausdrücke (auch wenn sie Funktionsaufrufe enthalten) von links nach rechts ausgewertet. Deshalb ist das Ergebnis seit C++17 garantiert

```
e="abc"
```

Bei Funktionsaufrufen ist aber nach wie vor nicht garantiert, dass die Argumente von links nach rechts ausgewertet werden. Deswegen kann mit der Funktion

```
void z(int, int, int) {}
```

der Wert von e nach dem Aufruf

```
z(f(), g(), h());
```

wie vor jede Permutation von "a", "b" und "c" sein.

Diese Regeln können sich bei verschachtelten Funktionsaufrufen wie auswirken. Das Ergebnis von

```
std::string s = "Horst nimmt Matilda auf den Arm.";
s.replace(0, s.find("Ma"), "").
  replace(s.find("auf den"), 9, "strahlt, Horst wirds ganz wa");
```

entspricht vor C++17 (*Projekt Eigenschaften|C/C++|Sprache|Sprachstandard|Standard*) vermutlich nicht den Erwartungen:

```
// s = "Matilda auf den Arm.strahlt, Horst wirds ganz wa"
```

Mit dem Sprachstandard C++17 erhält man dagegen

```
// s = "Matilda strahlt, Horst wirds ganz warm."
```

Seit C++17 ist nicht nur die Reihenfolge von Postfix-Ausdrücken, sondern auch die von Zuweisungsausdrücken und Operanden der Operatoren << und >> von links nach rechts.

## 8 Objektorientierte Programmierung

Bis ca. 1975 waren vordefinierte Datentypen wie *int* und *double* die überwiegend verwendeten Datentypen. Im Lauf der Zeit hat sich dann aber die Überzeugung durchgesetzt, dass bei komplexeren Aufgaben problemangemessene Datentypen besser sind. Da der Datentyp einer Variablen festlegt, welche Operationen mit dieser Variablen möglich sind, bietet ein problemangemessener Datentyp im Idealfall genau die Operationen, die für die Lösung des anstehenden Problems hilfreich sind.

Bei der objektorientierten Programmierung werden Datentypen definiert, die Daten mit Funktionen für diese Daten zusammenfassen. Diese Funktionen sind dann die einzigen Operationen, die mit den Daten der Variablen möglich sind. Dadurch können unzulässige Operationen mit den Daten unterbunden werden.

Objektorientierte Programmierung beruht vor allem auf den Konzepten **Klasse**, **Objekt**, **Vererbung** und **Polymorphie**. Diese finden sich in vielen modernen Programmiersprachen.

- Eine **Klasse** definiert einen Datentyp. Meist fasst eine Klasse Daten und Funktionen zusammen und bringt so explizit zum Ausdruck, dass diese zusammengehören. Eine solche Zusammenfassung ist in nicht objektorientierten Sprachen in der Regel nicht möglich.
- **Vererbung** ermöglicht die Konstruktion von neuen Klassen aus vorhandenen. Die neuen Klassen übernehmen die Elemente der Basisklassen und können zusätzliche Elemente haben. Auf diese Weise kann man eine Basisklasse als Baustein wiederverwenden.
- Vererbung ist außerdem die Grundlage für **Polymorphie**. Dabei wird beim Aufruf einer Funktion aus einer Klassenhierarchie erst zur Laufzeit (und nicht schon bei der Kompilation) entschieden, welche Funktion aufgerufen wird.

Nahezu alle anspruchsvollen und komplexen Programme (z.B. mit grafischen Benutzeroberflächen), Apps usw. verwenden heute die objektorientierte Programmierung. Ohne diese hätten sie kaum mit vertretbarem Aufwand realisiert werden.

Damit Klassen hilfreich sind, müssen sie allerdings richtig entworfen sein. Es ist meist einfach, Klassen zu schreiben, die der Compiler ohne Fehlermeldung übersetzen kann. Schwieriger ist es dagegen, sie so zu gestalten, dass sie sich auch in späteren Phasen eines Projekts bewähren. Deshalb werden auch die Grundbegriffe der objektorientierten **Analyse** und des objektorientierten **Designs** behandelt. Dabei zeigt sich, dass man oft nur mit den erst in Abschnitt 8.4.9 behandelten abstrakten Basisklassen ein tragfähiges Konzept erhält. Die Dramaturgie vieler Beispiele und Aufgaben soll verschiedene Design-Alternativen und die Schwierigkeiten bei der Auswahl der richtigen zeigen. In Abschnitt 8.4.9 zeigt sich dann, dass alles doch nicht so schwierig ist, wie es zunächst gelegentlich ausgesehen haben mag.

## 8.1 Klassen

In der objektorientierten Programmierung ist ein **Objekt** eine Zusammenfassung von Daten und Funktionen. Dieser Begriff hat der objektorientierten Programmierung den Namen gegeben.

In C++ ist ein Objekt eine Variable, deren Datentyp eine Klasse ist. Anstelle von Objekt sind auch die Bezeichnungen **Klassenobjekt**, **Klasseninstanz** oder **Instanz** verbreitet, die aber im Folgenden nicht verwendet werden. Zur Vermeidung von umständlichen Formulierungen werden Objekte auch als Variablen bezeichnet und umgekehrt, falls es nicht darauf ankommt, ob ein Datentyp eine Klasse ist.

Die Syntax einer Klassendefinition ergibt sich aus den folgenden Regeln. Diese sind gegenüber dem C++-Standard stark vereinfacht, decken aber praktisch alle im Folgenden behandelten Fälle ab:

```

class-specifier:
    class-head { member-specificationopt }

class-head:
    class-key class-name class-virt-specifieropt base-clauseopt

class-virt-specifier:
    final

class-key:
    class
    struct
    union
  
```

Klassen werden meist mit dem Schlüsselwort *class* oder *struct* definiert. Anstelle von *class* oder *struct* kann man auch *union* verwenden. Bei mit *union* definierten Klassen sind allerdings zahlreiche Einschränkungen zu beachten. Deshalb werden solche Klassen im Rahmen der objektorientierten Programmierung nur selten verwendet und im Folgenden auch nicht weiter berücksichtigt.

Auf *class* oder *struct* folgt dann der Name der Klasse (ein Bezeichner), eventuell *final* und eine Basisklasse. Danach werden in geschweiften Klammern die Elemente der Klasse angegeben.

### 8.1.1 Datenelemente und Elementfunktionen

Die Elemente einer Klasse werden durch geschweifte Klammern zusammengefasst.

```

class-specifier:
    class-head { member-specificationopt }
  
```

Zwischen den geschweiften Klammern können Elementdeklarationen und Zugriffsrechte (access-specifier) stehen:

*member-specification:*

*member-declaration member-specification<sub>opt</sub>*  
*access-specifier : member-specification<sub>opt</sub>*

Elemente können Funktionen, Datenelemente sowie weitere Deklarationen angegeben werden.

*member-declaration:*

*decl-specifier-seq<sub>opt</sub> member-declarator-list<sub>opt</sub>*;  
*function-definition*

In der Programmiersprache C können mit *struct* (siehe Abschnitt 5.1) nur Datenelemente zusammengefasst werden. Da objektorientierte Programmierung aber durch die Zusammenfassung von Daten und Funktionen gekennzeichnet ist, werden hier vor allem Klassen definiert, die auch Funktionen enthalten. Eine Funktion, die zu einer Klasse gehört, wird als **Elementfunktion** (member function) bezeichnet.

Beispiel: Die Klasse *C2DPunkt* soll einen zweidimensionalen Punkt darstellen. Sie fasst dessen Koordinaten *x* und *y* (Datenelemente) sowie die Funktionen *Init*, *toStr* und *anzeigen* zusammen.

```
class C2DPunkt{
    double x,y;
    void Init(double x_, double y_);
    string toStr();
    void anzeigen();
}; // Semikolon am Ende einer Klasse notwendig
```

Anstelle von *class* kann bei einer Klassendefinition auch *struct* verwendet werden:

```
struct C2DPunkt{
    double x,y;
    void Init(double x_, double y_);
    string toStr();
    void anzeigen();
}; // Semikolon am Ende einer Klasse notwendig
```

Die Unterschiede zwischen einer Klassendefinition mit *struct* und *class* werden in Abschnitt 8.1.3 beschrieben.

Eine Klasse muss durch eine **Semikolon** abgeschlossen. Wie bei einer gewöhnlichen Funktion ist ein solches Semikolon am Ende einer Elementfunktion zulässig, aber nicht notwendig.

Eine Elementfunktion kann innerhalb oder außerhalb der Klasse definiert werden. Wenn sie **außerhalb der Klasse definiert** wird, muss sie zuvor in der Klasse durch die Angabe ihres Prototyps deklariert werden. Bei der Definition gibt man vor ihrem Namen den Namen der Klasse und den Bereichsoperator „::“ an.

Beispiele: Nach den Deklarationen des letzten Beispiels können die Funktionen für die Klasse *C2DPunkt* folgendermaßen definiert werden:

```
void C2DPunkt::Init(double x_, double y_)
{
    x = x_;
    y = y_;
}; // Semikolon zulässig, aber nicht notwendig

string C2DPunkt::toStr()
{
    return "(" + std::to_string(x) + "|" + std::to_string(y)
+ ")";
} // z.B. (2,345|3,45678)

void C2DPunkt::anzeigen()
{
    cout << toStr() << endl;
}
```

Wenn eine **Elementfunktion** nicht außerhalb, sondern **innerhalb der Klasse definiert** (und nicht nur deklariert) wird, ist sie automatisch eine **inline-Funktion**. Deshalb kann eine Klasse mit solchen Funktionsdefinitionen in einer Header-Datei enthalten sein.

Beispiel: Die folgende Klassendefinition unterscheidet sich von der aus dem letzten Beispiel nur dadurch, dass die Funktionen hier *inline*-Funktionen sind. Dabei ist es unerheblich, ob die Klasse mit *class* oder *struct* definiert wird.

```
class C2DPunkt{
    double x,y;

    void Init(double x_, double y_)
    {
        x = x_;
        y = y_;
    };

    string toStr()
    {
        return "(" + std::to_string(x) + "|" +
                                std::to_string(y) + ")";
    } // z.B. (2,345|3,45678)

    void anzeigen()
    {
        cout << toStr() << endl;
    }
};
```

**Default-Argumente** kann man sowohl bei der Deklaration in der Klasse als auch bei der Definition außerhalb angeben, wenn die Klassen nicht auf eine Header-Datei und in eine Implementationsdatei verteilt wird (siehe Abschnitt 8.2.14).

Für den Compiler wird durch **jede Definition einer Klasse** ein **neuer Datentyp** erzeugt. Deshalb werden durch die beiden Klassendefinitionen in

```
struct { int i; } s1;
struct { int i; } s2;
```

zwei verschiedene Datentypen erzeugt, obwohl man auch erwarten könnte, dass die Datentypen von *s1* und *s2* gleich sind. Da die Datentypen von *s1* und *s2* verschieden sind, verweigert der Compiler die Übersetzung der Zuweisung

```
s1 = s2; // Kein "="-Operator stimmt mit diesen Operanden überein.
```

Verwendet man dagegen denselben Klassennamen bei der Definition von Variablen, haben sie denselben Datentyp und können einander zugewiesen werden. Nach der Definition

```
C2DPunkt p1;
C2DPunkt p2;
```

wird die folgende Zuweisung vom Compiler akzeptiert:

```
p1 = p2;
```

Seit C++11 kann ein Datenelement bei seiner Definition initialisiert werden. Das ist im Wesentlichen mit derselben Schreibweise wie bei der Initialisierung von Variablen mit `=` und geschweiften Klammern möglich. Es gibt aber einige Einschränkungen: Eine Initialisierung in der Konstruktor-Schreibweise (mit runden Klammern) ist für Klassenelemente nicht möglich. *auto* und *constexpr* Datenelemente sind nicht zulässig.

Beispiel: Einige Beispiele, wie Datenelemente bei ihrer Definition initialisiert werden können:

```
struct C {
    int i = 17;
    int j { 2 }; // Initialisierungslisten gehen auch
    int k = i; // nicht konstante Initialisierer gehen auch
    const int Max = i; // Max ist keine Compilezeitkonstante
    // constexpr int M = 10; // Fehler: constexpr geht nicht
    // auto a=17; // Fehler: auto geht hier nicht
    string s = ""; // Element eines Klassentyps
    // string t("123"); // das geht nicht
    const string cs = "konstant";
};
```

In den folgenden Beispielen und Aufgaben sollen die Klassen immer in einer eigenen Header-Datei definiert werden, die dem Projekt entweder mit



*Projekt|Neues Element hinzufügen|Visual C++|Code|Headerdatei (.h)*

oder mit *Projekt|Klasse hinzufügen* (hier muss *Inline* markiert sein und *Verwaltet* nicht)

## Klasse hinzufügen

Klassenname:  H-Datei:  ... CPP-Datei:  ...

Basisklasse:  Zugriff:

Andere Optionen:

☐ Virtueller Destruktor

☒ **Inline**

☐ Verwaltet

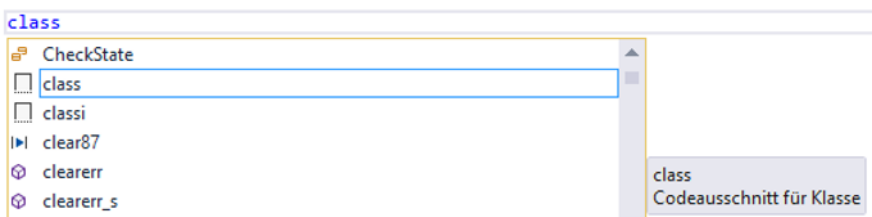
hinzugefügt wurde. Diese Vorgehensweise, alle Klassen in der Header-Datei zu definieren, ist sehr einfach und für größere Projekte oft nicht angemessen. Sie umschifft aber einige Fehlermöglichkeiten, über die Anfänger oft stolpern, wenn sie die Klassendefinition auf eine Header- und Cpp-Datei aufteilen. In Abschnitt 8.2.16 wird gezeigt, wie man die Definitionen aus einer Header-Datei von Visual Studio in eine Cpp-Datei verschieben lassen kann.

Diese Klasse kann man dann nach einer *#include*-Anweisung wie

```
#include "MeineKlasse.h"
```

verwenden.

Klassen kann man auch mit einem Code-Ausschnitt erzeugen lassen. Wählt man nach dem Eintippen von „class“



mit der Tab-Taste den Code-Ausschnitt „class“ aus, fügt Visual Studio eine Klasse ein, deren Elementfunktionen außerhalb der Klasse definiert sind. Mit dem Code-Ausschnitt „classi“ erhält man eine Klasse mit Elementfunktionen innerhalb der Klasse:

```
class MyClass
{
public:
    MyClass()
    {
    }
}
```

```

~MyClass()
{
}

private:
};

```

Da man die hier erzeugten Funktionen aber nicht in jeder Klasse benötigt, ist der praktische Nutzen dieser Code-Ausschnitte gering.

### 8.1.2 Der Gültigkeitsbereich von Klassenelementen

Die Zusammengehörigkeit der Elemente einer Klasse kommt insbesondere dadurch zum Ausdruck, dass man in einer Elementfunktion die Elemente der Klasse allein über ihren Namen ansprechen kann. Es ist dabei nicht notwendig, die Klasse in irgendeiner Form anzugeben.

Beispiel: In der Funktion *Init* sind *x* und *y* die Datenelemente der Klasse *C2DPunkt*. In der Funktion *anzeigen* wird die Elementfunktion *toStr* aufgerufen:

```

class C2DPunkt {
    double x, y;
    void Init(double x_, double y_);
    string toStr();
    void anzeigen();
}; // Semikolon am Ende einer Klasse notwendig

void C2DPunkt::Init(double x_, double y_)
{
    x = x_; // x und y sind die Datenelemente aus der
    y = y_; // Klasse C2DPunkt
};

string C2DPunkt::toStr()
{
    return "(" + std::to_string(x) + "|" + std::to_string(y)
           + ")";
} // z.B. (2,345|3,45678)

void C2DPunkt::anzeigen()
{
    cout << toStr() << endl;
}

```

Der Bereich im Quelltext, in dem der Name eines Klassenelements dieses Element bezeichnet, wird als **Klassengültigkeitsbereich** (*class scope*) bezeichnet. Er erstreckt sich:

- nicht nur von der Deklaration des Namens bis zum Ende der Klasse, sondern auch
- **auf alle Elementfunktionen** der Klasse, in denen der Name nicht durch eine lokale Deklaration desselben Namens verdeckt wird. Dabei ist es unerheblich, ob die

Funktionsdefinition vor oder nach der Deklaration des Namens steht und ob die Funktion innerhalb oder außerhalb der Klasse definiert wird.

- Falls in einer Elementfunktion derselbe Name wie in der Klasse deklariert wird, **verdeckt** die lokale Deklaration in der Funktion die der Klasse.

Ein in einer Elementfunktion verdecktes Klassenelement kann man mit dem Bereichsoperator ansprechen. Dazu gibt man vor seinem Namen den Namen der Klasse und den Bereichsoperator „::“ an. Deshalb stehen alle Klassenelemente in allen Elementfunktionen zur Verfügung.

Beispiele:

1. Der Klassengültigkeitsbereich ermöglicht es, **Variablen**, Klassen, typedefs usw. zu definieren, die nur in **ganz bestimmten Funktionen** einer Übersetzungseinheit zur Verfügung stehen, aber in anderen Funktionen nicht. Dazu muss man nur diese Variablen usw. in einer Klasse zusammenfassen.

In nicht objektorientierten Sprachen wie C besteht diese Möglichkeit nicht. Wenn man da Variable, Klassen usw. definieren will, die in mehr als einer Funktion verfügbar ist, muss man sie global definieren. Dann sind sie aber auch in allen anschließend definierten Funktionen verfügbar. Es ist nicht möglich, eine Variable x zu definieren, die nur in zwei Funktionen f1 und f2 verfügbar ist, aber nicht in einer anschließend definierten Funktion f3:

|                                |                                    |
|--------------------------------|------------------------------------|
| <code>int x;</code>            | <code>class C {</code>             |
|                                | <code>int x;</code>                |
| <code>void f1()</code>         | <code>void f1()</code>             |
| <code>{ x = 17; }</code>       | <code>{ x = 17; }</code>           |
| <code>void f2()</code>         | <code>void f2()</code>             |
| <code>{ x = 18; }</code>       | <code>{ x = 18; }</code>           |
|                                | <code>};</code>                    |
| <code>void f3()</code>         | <code>void f3()</code>             |
| <code>{ x = 19; } // ok</code> | <code>{ x = 19; } // Fehler</code> |

Die Zugriffsrechte auf die Elemente eines Objekts einer Klasse werden in Abschnitt 8.1.3 beschrieben.

2. Ein Klassenelement kann auch vor seiner Definition in der Klasse verwendet werden:

```
int x, y;

class C2DPunkt{
    void Init(double x_, double y_)
    {
        x = x_;
        y = y_;
    }
}
```

```
double x, y;
};
```

Hier werden in der Elementfunktion *Init* die Klassenelemente *x* und *y* und nicht etwa die globalen Variablen *x* und *y* angesprochen.

3. Wenn man in einer Elementfunktion denselben Namen wie in der Klasse lokal deklariert, verdeckt die lokale Deklaration die der Klasse:

```
void C2DPunkt::Init(double x_, double y_)
{
    double x;
    x = x_; // hier ist x die lokale Variable
    y = y_;
}
```

Das gilt insbesondere auch für die Parameter einer Elementfunktion:

```
void C2DPunkt::Init(double x, double y)
{
    x = x; // hier sind x und y die Parameter aus der
    y = y; // Parameterliste
}
```

Deshalb wählt man für die Parameter einer Elementfunktion meist andere Namen als für die Datenelemente.

4. Die durch eine lokale Deklaration verdeckten Namen der Klassenelemente kann man mit dem Namen der Klasse und dem Bereichsoperator oder mit *this->* (siehe Abschnitt 8.1.4) ansprechen. Deswegen muss man für die Parameter einer Elementfunktion nicht zwingend andere Namen wie für die Elemente wählen:

```
void C2DPunkt::Init(double x, double y)
{
    C2DPunkt::x = x;
    C2DPunkt::y = y;
}
```

oder

```
void C2DPunkt::Init(double x, double y)
{ // this wird in Abschnitt 8.1.4 beschrieben
    this->x = x;
    this->y = y;
}
```

Allerdings ist die erste dieser beiden Varianten nicht sehr verbreitet. Insbesondere muss man so bei einer Änderung des Namens der Klasse diesen auch beim Zugriff auf die Elemente ändern.

Der **Klassengültigkeitsbereich** ist neben dem **blockbezogenen** (lokalen) **Gültigkeitsbereich** (der durch eine Verbundanweisung { ... } begrenzt ist, siehe Abschnitt 2.4.1) und dem Gültigkeitsbereich in einem **Namensbereich** (siehe Kapitel 9) ein weiterer Gültigkeitsbereich. Ein Gültigkeitsbereich

- definiert einen Bereich im Quelltext, in dem eine deklarierte Einheit (z.B. eine Variable) allein mit ihrem Namen angesprochen werden kann.
- kann eine weitere Deklaration desselben Namens enthalten. In diesem verschachtelten Gültigkeitsbereich wird die Deklaration aus dem umgebenden Gültigkeitsbereich verdeckt.

Eine Klasse kann außer Datenelementen und Elementfunktionen auch verschachtelte Klassen, Aufzählungstypen und *typedef*-Deklarationen usw. enthalten.

Beispiel: Die Klasse C enthält die verschachtelte Klasse D, den Aufzählungstyp E, sowie die *typedef*-Deklaration G, die in der Elementfunktion f verwendet werden:

```
class C {
    class D { }; // eine verschachtelte Klasse
    enum class E { e1, e2 };
    typedef int F;
    using G = int;
    void f()
    {
        D d;
        E e = E::e1;
        F f=17;
    }
};
```

Außerhalb der Klasse C kann man sie nur verwenden, wenn sie in C *public* sind:

```
void g()
{
    C::D d;
    C::E i = C::e1;
    C::F x = C::F::e1;
}
```

### 8.1.3 Datenkapselung: Die Zugriffsrechte *private* und *public*

Eine Klasse ist ein Datentyp und ein Objekt eine Variable, deren Datentyp eine Klasse ist. Deshalb kann man ein Objekt wie eine Variable eines einfachen Datentyps definieren. Es enthält dann alle Elemente der Klasse. Diese kann man unter dem Namen des Objekts ansprechen, auf den ein Punktoperator „.“ und der Name des Elements folgt. Mit einem Zeiger auf ein Objekt kann man auch den Pfeiloperator „->“ verwenden.

Beispiel: Mit der Klasse *C2DPunkt* erhält man durch die folgenden Definitionen zwei Objekte p bzw. \*pc dieser Klasse:

```
C2DPunkt p;  
C2DPunkt* pc = new C2DPunkt;
```

Diese Objekte enthalten dann die Datenelemente

$p.x$  und  $p.y$

bzw.

$pc->x$  und  $pc->y$

Solange eine Klasse keine virtuellen Elementfunktionen oder statischen Elemente (mehr darüber später) enthält, ergibt sich der **Speicherplatzbedarf** für ein Objekt nur aus dem für seine Datenelemente. Die Elementfunktionen tragen nicht dazu bei. Falls der Compiler für die Elemente eines Objekts nicht mehr Platz als notwendig reserviert, belegt ein Objekt genauso viel Speicherplatz wie alle Datenelemente seiner Klasse zusammen:

`sizeof(C2DPunkt) = sizeof(double) + sizeof(double) = 16`

Mit den **Zugriffsrechten** *private*, *protected* und *public* kann man für jedes Klassenelement explizit festlegen, ob man von außerhalb einer Elementfunktion (d.h. über ein Objekt oder aus einer abgeleiteten Klasse) darauf zugreifen kann. Auf den Zugriff aus einer Elementfunktion hat ein solches Zugriffsrecht keinen Einfluss: Wie schon im letzten Abschnitt gesagt wurde, kann man in einer Elementfunktion auf jedes Klassenelement zugreifen.

*access-specifier:*

```
private  
protected  
public
```

Diese Spezifizierer definieren ab ihrer Angabe einen Abschnitt mit Zugriffsrechten, die für alle folgenden Elemente bis zum nächsten solchen Spezifizierer oder bis zum Ende der Klasse gelten. Ohne die Angabe eines Zugriffsrechts ist das Zugriffsrecht *private*. Ein Element aus einem *private*, *protected* oder *public* Abschnitt heißt auch *private*, *protected* oder *public* Element.

- Ein **public** Element kann über ein Objekt angesprochen werden.
- Ein **private** oder **protected** Element kann nicht über ein Objekt angesprochen werden. Eine Ausnahme sind *friend*-Funktionen (siehe Abschnitt 8.2.3) der Klasse.
- Der Unterschied zwischen *private* und *protected* wirkt sich nur in abgeleiteten Klassen aus: Ein **protected** Element kann in einer abgeleiteten Klasse (siehe Abschnitt 8.3.2) angesprochen werden.

|                  | Zugriff über ein Objekt |
|------------------|-------------------------|
| <i>public</i>    | ja                      |
| <i>private</i>   | nein                    |
| <i>protected</i> | nein                    |

Ohne die Angabe eines Zugriffsrechts sind alle Elemente einer mit *class* definierten Klasse *private*, während alle Elemente einer mit *struct* definierten Klasse *public* sind. Dieses voreingestellte Zugriffsrecht ist der **einzige Unterschied** zwischen einer mit *class* und einer mit *struct* definierten Klasse.

Beispiel: Alle Elemente der Klassen C0 und C1 haben das Zugriffsrecht *private*:

```
class C0 {
    int x;
    int f() { return x; }
};

struct C1 {
    private:
    int x;
    int f() { return x; }
};
```

Jeder Zugriff auf diese Elemente über ein Objekt führt zu einer Fehlermeldung:

```
void test(C0 a, C1 b)
{
    a.x = 1; //Fehler: Kein Zugriff auf private Member
    a.f();   //Fehler: Kein Zugriff auf private Member
    b.x = 1; //Fehler: Kein Zugriff auf private Member
    b.f();   //Fehler: Kein Zugriff auf private Member
}
```

Mit dem Zugriffsrecht *public* sind alle diese Zugriffe zulässig:

```
class C0 {
    public:
    int x;
    int f() { return x; }
};

struct C1 {
    int x;
    int f() { return x; }
};
```

Eine Klasse kann eine **beliebige Anzahl von Abschnitten** mit verschiedenen Zugriffsrechten in einer beliebigen **Reihenfolge** enthalten. Die Reihenfolge der Abschnitte ist dabei ohne Bedeutung. Es wird aber gelegentlich empfohlen, sie in der Reihenfolge *public*, *protected* und *private* aufzuführen. Dann kommen die Elemente zuerst, die für einen Anwender der Klasse von Bedeutung sind, und dieser muss dann den Rest der Klasse überhaupt nicht mehr anschauen, der nur für einen Entwickler von abgeleiteten Klassen (*protected* Elemente) oder dieser Klasse (*private* Elemente) von Bedeutung ist.

Beispiel: Die beiden Klassen C1 und C2 sind gleichwertig. Oft werden die verschiedenen Abschnitte wie bei C1 in der Reihenfolge *private*, *protected* und *public* aufgeführt.

Wenn man sie aber wie bei *C2* in der umgekehrten Reihenfolge anordnet, kommen die Elemente, die für einen Benutzer wichtig sind, am Anfang:

```
class C1 {
    int x;
    public:
    int f(C p);
};

class C2 {
    public:
    int f(C p);
    private:
    int x;
};
```

Ein **Benutzer** einer Klasse ist dadurch charakterisiert, dass er eine Variable des Klassentyps definiert (ein Objekt) und dann auf ihre Elemente zugreift (z.B. Elementfunktionen aufruft). Da man über ein Objekt nur auf die *public* Elemente zugreifen kann, werden diese auch als **Schnittstelle** der Klasse bezeichnet.

Beispiel: Die Schnittstelle der Klasse *Datum\_1* besteht aus den Datenelementen *Tag*, *Monat* und *Jahr*, und die der Klasse *Datum\_2* aus den Funktionen *setze*, *Tag*, *Monat* und *Jahr*. Über ein Objekt der Klasse *Datum\_2* ist kein Zugriff auf die Elemente *Tag*, *Monat* und *Jahr* möglich.

```
class Datum_1 {
    public:
    int Tag, Monat, Jahr;
};

class Datum_2 {
    public:
    bool gueltigesDatum(int Tag, int Monat, int Jahr)
    {
        int MaxTag = 31;
        if ((Monat == 4) || (Monat == 6) ||
            (Monat == 9) || (Monat == 11)) MaxTag = 30;
        else if (Monat == 2)
        {
            bool Schaltjahr = ((Jahr % 4 == 0) &&
                               (Jahr % 100 != 0)) || (Jahr % 400 == 0);
            if (Schaltjahr) MaxTag = 29;
            else MaxTag = 28;
        }
        return ((1 <= Monat) && (Monat <= 12) &&
                (1 <= Tag) && (Tag <= MaxTag));
    }

    void setze(int Tag, int Monat, int Jahr)
    {
```



```

    if (gueltigesDatum(Tag, Monat, Jahr))
    {
        Tag_ = Tag;
        Monat_ = Monat;
        Jahr_ = Jahr;
    }
    else Fehlermeldung("Ungültiges Datum");
}

int Tag() { return Tag_; }
int Monat() { return Monat_; }
int Jahr() { return Jahr_; }
private:
    int Tag_, Monat_, Jahr_;
};

```

Auf den ersten Blick mag es unsinnig erscheinen, den Zugriff auf Elemente zu sperren (**Datenkapselung, information hiding**). Wozu hat man sie dann überhaupt definiert? Die folgenden Punkte zeigen, dass *private* Datenelemente gravierende **Vorteile** haben können:

- Das Zugriffsrecht *private* ermöglicht die **Trennung** der **Implementation** einer Klasse von ihrer **Schnittstelle**. Dann kann ein Benutzer die Klasse auch nach einer Änderung ihrer Implementation wie bisher verwenden, ohne seine Aufrufe zu ändern.

Beispiel: Um mit Kalenderdaten rechnen zu können, stellt man ein Datum oft durch die Anzahl der Tage seit einem bestimmten Stichtag dar. Bei einer Klasse wie *Datum\_2* kann man die interne Darstellung und die Implementation der Funktionen ändern, so dass ein Anwender den bisher geschriebenen Code weiterverwenden kann. Bei einer Klasse wie *Datum\_1* ist das dagegen nicht möglich.

Obwohl solche Änderungen nach einer vollständigen Problemanalyse eigentlich nicht vorkommen dürften, sind sie in Praxis nicht selten: Oft erkennt man erst während der Entwicklung eines Systems alle Anforderungen, bzw. nach der Fertigstellung, dass Algorithmen zu langsam sind und optimiert werden müssen. Bei großen Projekten ändern sich die Anforderungen oft während ihrer Realisierung (z.B. durch neue Gesetze).

- Bei *private* Datenelementen ist der **Bereich** im Quelltext eines Programms, in dem sie verändert werden können, **kleiner** als bei *public* Elementen. Je kleiner dieser Bereich ist, desto kleiner ist der Bereich, in dem sie einen Fehler verursachen können und in dem man nach seiner Ursache suchen muss.

Beispiel: In der Klasse *Datum\_2* können die Datenelemente nur in der Funktion *setze* verändert werden. Falls ein Objekt dieser Klasse ein ungültiges Datum darstellt, muss die Ursache dieses Fehlers in der Funktion *setze* sein. Mit der Klasse *Datum\_1* kann ein ungültiges Datum dagegen durch jedes Objekt dieser Klasse verursacht werden.

- Bei einem *private* Datenelement kann man gezielt festlegen, ob es nur gelesen oder auch geändert werden kann, indem man entsprechende Elementfunktionen zur Verfügung stellt.

Beispiel: In der Klasse *Datum\_2* können die einzelnen Datenelemente nur gelesen, aber nicht geändert werden.

Deshalb wird oft empfohlen, **alle Datenelemente** einer Klasse *private* zu deklarieren, und den Zugriff auf die *private* Elemente nur über **public Elementfunktion** zur ermöglichen. Falls durch den Zugriff auf Datenelemente eine Konsistenzbedingung verletzt werden kann, ist das aber nicht nur eine gut gemeinte Empfehlung, sondern ein Muss.

Oft sind auch **private Elementfunktionen** sinnvoll. Das sind meist Hilfsfunktionen, die nur in den Elementfunktionen aufgerufen werden, aber einem Benutzer der Klasse ausdrücklich nicht zur Verfügung stehen sollen.

Im Laufe dieses Kapitels wird als Beispiel immer wieder eine Stringklasse *MeinString* verwendet, die ähnlich wie die Stringklasse *string* der Standardbibliothek verwendbar sein soll. Diese Klasse soll einen String intern als Zeiger *s* auf einen nullterminierten String und ein Längenfeld darstellen.

Beispiel: Wenn die Länge wie hier ein *public* Datenelement ist,

```
class MeinString {
    char* s; // Zeiger auf nullterminierten String
public:
    int Laenge; // Länge des Strings
};
```

kann sie über jedes Objekt verändert werden, ohne dass dieser Wert der Länge entsprechen muss, auf die der Zeiger *s* zeigt. Um solche Inkonsistenzen zu vermeiden, muss jeder Anwender der Klasse (das sind bei den Strings der Standardbibliothek recht viele) in jeder Programmzeile, in der er auf einen String zugreifen kann, auf Inkonsistenzen achten.

Stellt man die Länge dagegen durch ein *private* Datenelement *n* dar und gibt diesen Wert durch eine Funktion zurück, kann der Anwender der Klasse die Länge nur lesen, aber nicht verändern. Dann hat er auch keine Möglichkeit, *n* und *s* in einen inkonsistenten Zustand zu bringen:

```
class MeinString {
    char* s; // Zeiger auf nullterminierten String
    int n; // Länge des Strings
public:
    int Laenge() { return n; } // Länge des Strings
};
```

Wenn der Entwickler dann in allen *public* Elementfunktionen der Klasse darauf achtet, dass *s* und *n* nie inkonsistent werden, kann der Anwender sicher sein, dass

n und s nie inkonsistent sind. Der Aufwand für einen solchen Nachweis durch den Entwickler ist viel geringer als der für alle Anwender.

### 8.1.4 Der Aufruf von Elementfunktionen und der *this*-Zeiger

Da zu einer Klasse Datenelemente gehören können, auf die man in einer Elementfunktion zugreifen kann, kann eine nicht statische Elementfunktion außerhalb einer Klasse nur nach der Definition eines Objekts aufgerufen werden. Es ist nicht möglich, eine Elementfunktion wie eine globale Funktion allein über den Namen aufzurufen, mit dem sie definiert wurde:

Beispiel: Der Aufruf einer nicht statischen Elementfunktion allein über ihren Namen führt zu einer Fehlermeldung des Compilers:

```
C2DPunkt::Init(0, 0); // error: Die erneute Dekla-
// ration der Memberfunktion ist unzulässig
```

Mit dem Objekt p bzw. einem Zeiger q auf ein Objekt

```
C2DPunkt p;
C2DPunkt* q = new C2DPunkt;
```

kann eine Elementfunktion mit dem Punkt- oder Pfeiloperator nach dem Namen des Objekts aufgerufen werden:

```
p.Init(0, 0);
q->Init(0, 0);
```

Beim **Aufruf einer** nicht virtuellen **Elementfunktion** bestimmt der Compiler die aufzurufende Funktion über den Datentyp, der bei der Definition des Objekts angegeben wurde. Wie bei einer gewöhnlichen Funktion steht so bereits zum Zeitpunkt der Kompilation fest, welche Funktion aufgerufen wird. Deshalb bezeichnet man diese Art der Auflösung von Funktionsaufrufen auch als **frühe Bindung**. Im Unterschied dazu spricht man bei den später vorgestellten virtuellen Funktionen von **später Bindung**, da sich hier erst während der Laufzeit des Programms ergibt, welche Funktion aufgerufen wird.

Beispiel: Nach der Definition der Objekte

```
C2DPunkt p1, p2;
```

wird jeder der beiden Aufrufe

```
p1.Init(0, 0);
p2.Init(1, 1);
```

in einen Aufruf von *C2DPunkt::Init* übersetzt, da *p1* und *p2* beide den Datentyp *C2DPunkt* haben.

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, woher die Elementfunktion *C2DPunkt::Init* weiß, dass sie beim ersten Aufruf die Datenelemente von *p1* und beim zweiten die von *p2* verwenden soll. Die Antwort ergibt sich daraus, dass der Compiler jeder nicht statischen

Elementfunktion automatisch die Adresse des aktuellen Objekts als zusätzlichen Parameter *this* übergibt. Über diesen Zeiger werden dann alle Klassenelemente adressiert.

Beispiel: Der Compiler übersetzt die Elementfunktion

```
void C2DPunkt::Init(double x_, double y_)
{
    x = x_;
    y = y_;
}
```

so, als ob sie mit einem zusätzlichen Parameter *this* vereinbart wäre, dessen Datentyp ein Zeiger auf ihre Klasse ist. Alle Klassenelemente werden über diesen Parameter *this* adressiert:

```
void C2DPunkt::Init(C2DPunkt* this, double x_, double y_)
{
    this->x = x_;
    this->y = y_;
}
```

Beim Aufruf einer Elementfunktion wird dann automatisch ein Zeiger auf das aktuelle Objekt für den Parameter *this* übergeben. Der Aufruf

```
p1.Init(0, 0);
```

wird übersetzt als

```
C2DPunkt::Init(&p1, 0, 0);
```

Der Parameter *this* kann in einer nicht statischen Elementfunktion verwendet werden. Das wird oft gemacht, wenn man in einer Elementfunktion für einen Parameter denselben Namen wie für ein Element verwenden will:

Beispiel: Die Parameter von *Init* haben dieselben Namen wie die Klassenelemente:

```
void C2DPunkt::Init(double x, double y)
{
    this->x = x;
    this->y = y;
};
```

### 8.1.5 Konstruktoren und Destruktoren

In den bisherigen Beispielen wurde die Elementfunktion *Init* dazu verwendet, die Datenelemente eines Objekts zu initialisieren. Damit man den Aufruf einer solchen Initialisierungsfunktion nicht versehentlich vergisst, kann man in C++ sogenannte Konstruktoren definieren. Der Compiler akzeptiert dann die Definition eines Objekts nur, wenn dabei ein Konstruktor aufgerufen wird.

Ein **Konstruktor** ist eine Elementfunktion der Klasse, die dadurch charakterisiert ist, dass sie denselben Namen wie die Klasse hat. Er darf keinen Rückgabebetyp haben (auch nicht *void*) und nicht *virtual* oder *static* sein (siehe Abschnitt 8.4.2 und 8.2.11). Eine Klasse kann mehrere Konstruktoren haben. Diese müssen sich dann wie alle anderen überladenen Funktionen durch hinreichend verschiedene Parameter unterscheiden. Die Parameter können auch Default-Argumente haben.

Ein Konstruktor wird in den folgenden Situationen automatisch aufgerufen:

1. Wenn man **ein Objekt durch eine Definition erzeugt**. Dabei muss nach dem Namen des Objekts eine Liste von Argumenten angegeben werden, die zur Parameterliste des Konstruktors passt. Bei der Definition des Objekts wird dann der Konstruktor mit diesen Argumenten aufgerufen.

Beispiel: Mit der Klassendefinition

```
class C2DPunkt {
    double x, y;
public:
    C2DPunkt(double x_)
    { // ein Parameter: x-Wert
        x = x_;
        y = 0;
    }

    C2DPunkt(double x_, double y_)
    {
        x = x_;
        y = y_;
    }
};
```

können folgendermaßen Objekte dieser Klasse definiert werden:

```
C2DPunkt p(3); // p=(3,0)
C2DPunkt q(5, 6); // q=(5,6)
```

Dagegen wird diese Definition vom Compiler nicht akzeptiert:

```
C2DPunkt p; // error: Kein Standardkonstruktor verfügbar
```

Die beiden Konstruktoren von *C2DPunkt* können auch durch einen einzigen mit einem Default-Argument ersetzt werden:

```
class C2DPunkt {
    double x, y;
public:
```

```

C2DPunkt(double x_, double y_ = 0)
{
    x = x_;
    y = y_;
}
};

```

Die Argumente für einen Konstruktor kann man auch in einer Initialisierungsliste übergeben:

```

C2DPunkt p{ 3 }; // p=(3,0)
C2DPunkt q{ 5, 6 }; // q=(5,6)

```

Der Zeitpunkt des Konstruktoraufrufs hängt von der Art der Definition ab:

- Bei einer globalen Definition wird der Konstruktor ein einziges Mal beim Start des Programms aufgerufen.
  - Bei einer lokalen nicht statischen Definition wird er bei jeder Ausführung der Deklarationsanweisung aufgerufen.
  - Bei einer lokalen statischen Definition wird er bei der ersten Ausführung der Definition aufgerufen.
2. Wenn ein **Objekt mit *new* erzeugt** wird. Dabei muss man nach *new* den Namen der Klasse und anschließend eine Liste von Argumenten für einen Konstruktor angeben. Bei der Ausführung der *new*-Anweisung wird dann der Konstruktor aufgerufen, der zu den Argumenten passt.

Beispiel: Mit der Klasse *C2DPunkt* aus dem letzten Beispiel sind die ersten beiden Definitionen möglich. Die dritte wird dagegen vom Compiler abgelehnt:

```

C2DPunkt* pp = new C2DPunkt(3); // *pp=(3,0)
C2DPunkt* pq = new C2DPunkt(5, 6); // *pq=(5,6)
C2DPunkt* p = new C2DPunkt; // Fehler

```

3. Ein **Konstruktor** kann **explizit** mit seinem Namen (also dem Namen der Klasse) **aufgerufen** werden. Dabei wird ein **temporäres Objekt** erzeugt, das keinen Namen hat. Solche Ausdrücke werden oft in einer Zuweisung, bei einer *return*-Anweisung, als Argument oder als Default-Argument verwendet.

Beispiel: In den mit 1, 2, 3 und 4 gekennzeichneten Anweisungen werden temporäre Objekte erzeugt:

```

C2DPunkt Nullpunkt()
{
    return C2DPunkt(0, 0); // 1
}

void f(const C2DPunkt& r = C2DPunkt(0, 0)) {}

```

```

C2DPunkt p(1, 2);
p = C2DPunkt(3, 4); // 2
f(C2DPunkt(5, 6)); // 3
f();               // 4

```

Die temporären Objekte in diesem Beispiel existieren nur während der Ausführung des Ausdrucks, in dem sie erzeugt werden. Ein temporäres Objekt, das eine Referenz initialisiert, existiert während der gesamten Lebensdauer des initialisierten Objekts. Deshalb existiert das beim Aufruf `f()` erzeugte temporäre Objekt bis zum Ende des Blocks der Funktion `f`.

Ein Konstruktor, der mit einem einzigen Argument aufgerufen werden kann, heißt **konvertierender Konstruktor** (siehe auch Abschnitt 8.2.9), da sein Aufruf wie eine Typkonversion aussieht. Dabei wird ein temporäres Objekt erzeugt. Solche Konstruktoren gehören zu den **benutzerdefinierten Konversionen** und werden oft dazu verwendet, einem Ausdruck einen bestimmten Datentyp zu geben:

```

const char* s = "12";
const char* t = "abc";
string u = s + t; //error: Zeiger können nicht addiert werden
string u = string(s) + t; // das geht - konvertierender Konstruktor

```

Ein temporäres Objekt wird außerdem durch einen *throw*-Ausdruck erzeugt.

4. Wenn eine Funktion einen Parameter hat, dessen Datentyp eine Klasse mit einem konvertierenden Konstruktor ist, dann kann die Funktion auch mit einem Argument für diesen Konstruktor aufgerufen werden. Der Compiler erzeugt dabei aus dem Argument mit dem konvertierenden Konstruktor ein temporäres Objekt, das der Funktion als Argument übergeben wird.

Beispiel: Die Klasse `C2DPunkt` von oben hat einen konvertierenden Konstruktor, der mit einem Ganzzahlargument aufgerufen werden kann. Deshalb kann man die Funktion

```
void f(C2DPunkt x) {}
```

auch mit einem Ganzzahlargument aufrufen. Dieser Aufruf führt dann zum Aufruf des Konstruktors, der aus dem Argument `y` ein temporäres Objekt `C2DPunkt(y)` erzeugt:

```
f(1); // f(C2DPunkt(1));
```

Solche Konversionen kann man mit *explicit* (siehe Abschnitt 8.2.9) unterbinden.

5. Bei der Definition eines **Arrays von Objekten** wird **für jedes Arrayelement** in der Reihenfolge der Indizes ein Konstruktor aufgerufen. Die Konstruktoren kann man in einer Initialisierungsliste angeben. Für Konstruktoren mit einem Parameter genügt ein Argument für den Konstruktor.

Beispiel: Mit der Klasse `C2DPunkt` erzeugt die folgende Definition die als Kommentar angegebenen Arrayelemente:

```
std::array<C2DPunkt,2> a{ C2DPunkt(1,2),3 }; // bzw.
                        C2DPunkt a[2] = { C2DPunkt(1,2),3 };
// a[0]=(1,2), a[1]=(3,0)
```

Enthält diese Liste weniger Elemente als das Array, werden die restlichen Elemente durch den sogenannten Standardkonstruktor initialisiert. Das ist ein Konstruktor, der ohne Argumente aufgerufen werden kann (siehe Abschnitt 8.2.1). Bei einem Array ohne eine Initialisierungsliste werden alle Elemente mit dem Standardkonstruktor initialisiert. Falls die Klasse keinen Standardkonstruktor hat, bringt der Compiler eine Fehlermeldung.

Beispiel: Die folgende Definition führt zum zweifachen Aufruf des Standardkonstruktors von *C2DPunkt*, falls dieser definiert ist, bzw. zu einer Fehlermeldung:

```
C2DPunkt* pa = new C2DPunkt[2];
```

6. Wenn eine Klasse Datenelemente eines Klassentyps enthält, wird beim Erzeugen eines Objekts der umgebenden Klasse ein Konstruktor für jedes enthaltene Objekt aufgerufen (siehe Abschnitt 8.2.2).
7. Kennzeichnet man einen Konstruktor mit *constexpr*, kann man mit diesem Konstruktor eine Compilezeit-Konstante (siehe Abschnitt 2.7.2) definieren:

Beispiel: Da die Klasse

```
class C
{
public:
    constexpr C() {};
```

einen *constexpr*-Konstruktor hat, kann man eine Compilezeit-Konstante von C anlegen:

```
constexpr C c;
```

Auch die Klasse *std::array* (siehe Abschnitt 4.2.6) hat einen *constexpr*-Konstruktor. Deswegen kann ein *std::array*-Objekt mit *constexpr* definiert werden:

```
constexpr std::array<int, 100> a = { 1,2 };
```

Die Klasse *string* (siehe Kapitel 3) hat dagegen erst ab C++20 einen *constexpr*-Konstruktor:

```
constexpr std::string s=""; // Fehler in C++17, ok in C++20
```

Normalerweise ist es die **Aufgabe eines Konstruktors**, alle Datenelemente eines Objekts der Klasse so zu initialisieren, dass sie beim Aufruf einer beliebigen Elementfunktion **konsistent** sind. Falls die Klasse keine Konsistenzbedingung hat, sollten sie zumindest in einem definierten Zustand sein. Wenn eine Elementfunktion der Klasse Datenelemente



verwendet, die nach dem Aufruf eines Konstruktors nicht initialisiert sind, ist das meist ein **Fehler**.

Beispiel: Nach der Definition

```
class C2DPunkt{
    double x,y;
public:
    C2DPunkt(double x_, double y_=0)
    {
        x=x_; // Initialisierung von y wurde vergessen
    }

    string toStr()
    {
        return "(" + std::to_string(x) + "|" +
            std::to_string(y) + ")";
    } // z.B. (2,345|3,45678)
};
```

wird beim Aufruf von *toStr* ein undefinierter Wert von *y* verwendet.

Bei einer Codeanalyse mit den C++ Core Guidelines (siehe Abschnitt 2.13) wird darauf hingewiesen, wenn ein Datenelement nicht initialisiert wird:

```
class AlleVariablenInitialisieren {
    int i, j;
public:
    AlleVariablenInitialisieren(int x, int y) : j(y) { }
    // warning C26495: Die Variable "i" ist nicht initialisiert. Eine
    //      Membervariable muss immer initialisiert werden (type.6).
    AlleVariablenInitialisieren() : i(0) { }
    // warning C26495 : Die Variable "j" ist nicht initialisiert.
};
```

Die von einem Objekt reservierten Ressourcen (z.B. Speicher) müssen am Ende seiner Existenz auch wieder freigegeben werden. Damit das nicht versehentlich vergessen wird, kann man diese Freigabe in einem **Destruktor** durchführen.

Ein Destruktor ist dadurch charakterisiert, dass sein Name mit dem Zeichen „~“ (Tilde) beginnt, auf das der Name der Klasse folgt. Ein Destruktor muss *public* sein und darf weder eine Parameterliste noch einen Rückgabetyt (auch nicht *void*) haben. Während eine Klasse also mehrere verschiedene Konstruktoren haben kann, kann sie nur einen einzigen Destruktor haben.

Ein Destruktor wird in den folgenden Situationen automatisch aufgerufen:

1. Beim Verlassen des Blocks, in dem ein lokales, nicht statisches Objekt durch eine Definition erzeugt wurde. Das gilt auch, wenn der Block verlassen wird, weil eine

Exception ausgelöst wird. Für ein Array von Objekten wird der Destruktor für jedes Element des Arrays aufgerufen.

2. Wird während der Ausführung eines Konstruktors eine Exception ausgelöst, dann wird für alle bisher konstruierten Objekte ihr Destruktor aufgerufen.
3. Am Ende des Programms für ein Objekt, das durch eine globale oder eine lokale statische Definition erzeugt wurde.
4. Wenn für ein mit *new* erzeugtes Objekt *delete* aufgerufen wird.
5. Für ein mit *new[]* erzeugtes Array von Objekten wird durch den Aufruf von *delete[]* der Destruktor für jedes Objekt des Arrays aufgerufen.
6. Wenn ein Objekt Element eines anderen Objekts ist, ruft der Destruktor des umgebenden Objekts die Destrukturen aller Elemente auf.
7. Bei einem temporären Objekt mit dem Ende der Ausdrucksanweisung, in der es erzeugt wurde. Falls das temporäre Objekt eine Referenz initialisiert, wird der Destruktor am Ende der Lebensdauer der Referenz aufgerufen.

Beim Aufruf eines Destruktors werden zuerst die Anweisungen in seinem Anweisungsteil ausgeführt. Danach werden die Destrukturen aller Datenelemente in der umgekehrten Reihenfolge ihrer Definition aufgerufen und danach die Destrukturen aller Basisklassen in der umgekehrten Reihenfolge ihrer Definition.

Beispiel: Beim Aufruf der Funktion *test*

```
class C {
public:
    ~C() // Destruktor
    {
        cout << "Destruktor" << endl;
    }
};

void test()
{
    C* pc = new C;
    delete pc; // 1. Aufruf des Destruktors
    C c;
    cout << "vor dem Blockende" << endl;
} // 2. Aufruf des Destruktors
```

werden die folgenden Meldungen ausgegeben:

```
Destruktor
vor dem Blockende
Destruktor
```

Falls für eine Klasse kein Destruktor definiert wird, erzeugt der Compiler einen als *public inline* Funktion mit einem leeren Anweisungsteil:

```
C::~~C() { }
```

Dieser **automatisch erzeugte Destruktor** ist ausreichend, falls alle von einem Objekt reservierten Ressourcen am Ende seiner Lebenszeit wieder freigegeben werden. Das gilt insbesondere dann, wenn in den Konstruktoren nur Elemente initialisiert werden. Deshalb muss man nicht für jede Klasse einen Destruktor definieren. Ein mit *new* reservierter Speicherbereich wird allerdings nicht automatisch wieder freigegeben. Deshalb benötigt jede Klasse einen Destruktor, die in einem Konstruktor oder in einer Elementfunktion mit *new* Speicher reserviert.

Beispiel: Nimmt man in eine Klasse ein Element der Klasse C aus dem letzten Beispiel auf

```
class D {
    C c;
}; // D hat einen implizit erzeugten Destruktor
```

wird beim Aufruf des Destruktors von D automatisch der Destruktor von C aufgerufen. Beim Verlassen des Blocks

```
{
    C c;
} // 2. Aufruf des Destruktors
```

erhält man die Meldung

Destruktor

Da eine Klasse nur einen einzigen Destruktor hat, muss die Reservierung der Ressourcen in allen Konstruktoren so erfolgen, dass sie im Destruktor wieder freigegeben werden können. Falls z.B. ein Konstruktor eine bestimmte Ressource reserviert, während ein anderer Konstruktor sie nicht reserviert, muss sich im Destruktor feststellen lassen, ob sie freigegeben werden muss. Solche Fallunterscheidungen können vermieden werden, indem die Ressourcen in allen Konstruktoren durch dieselben Anweisungen reserviert werden.

Konstruktoren und Destrukturen unterliegen denselben **Zugriffsrechten** wie alle anderen Klassenelemente: Damit ein Objekt mit einem Konstruktor angelegt werden kann, muss dieser *public* sein.

Betrachten wir als weiteres Beispiel die am Ende von Abschnitt 8.1.3 vorgestellte **einfache Stringklasse** *MeinString*. Diese soll jetzt um einen Konstruktor erweitert werden, mit dem ein *MeinString* wie ein *string* aus einem als Argument übergebenen Zeiger auf einen nullterminierten String erzeugt wird:

```
string s("abc");
```

Der interne Zeiger soll auf eine Kopie des Arguments zeigen, und der dafür notwendige Speicherplatz soll auf dem Heap reserviert werden.

```
class MeinString {
    char* s; // Zeiger auf nullterminierten String
    int n;  // Länge des Strings
```

```

public:
    MeinString(const char* p) // 1
    { // p muss auf einen nullterminierten String zeigen
        n = strlen(p);
        s = new char[n + 1];
        strcpy(s, p);
    };

```

Der nächste Konstruktor ermöglicht die Initialisierung eines Strings mit einem einzigen Zeichen des Datentyps *char*:

```

MeinString(char c)
{
    n = 1;
    s = new char[n + 1];
    *s = c;
    *(s + 1) = '\0';
};

```

Dieser Destruktor gibt den von einem String reservierten Speicher wieder frei:

```

~MeinString()
{
    delete[] s;
};

```

### Aufgaben 8.1.5

1. Beschreiben Sie die Aufgaben eines Konstruktors und Destruktors. Werden diese Aufgaben in der folgenden Klasse erfüllt?

```

class C {
    int n, max;
    int* a;
public:
    C()
    {
        max = 100;
        a = new int[max];
    }

    C(int i)
    {
        n = 1;
        a = new int[100];
        a[0] = i;
    };

```

```

C(int i, int j)
{
    n = 2;
    max = 100;
    a = new int[100];
    a[1] = i;
    a[2] = j;
};

void add_data(int d)
{
    if (n < max - 1)
    {
        ++n;
        a[n] = d;
    }
}

void show_data()
{
    for (int i = 0; i < n; ++i)
        cout << a[i] << endl;
}
};

```

2. Für welche der folgenden Klassen muss man einen Destruktor definieren?

a) `class C1 {`  
`int x, y, z;`  
`public:`  
`C1(int x_ = 0, int y_ = 0, int z_ = 0)`  
`{`  
 `x = x_; y = y_; z = z_;`  
`}`  
`};`

b) `class C2 {`  
`int* x;`  
`public:`  
`C2(int n)`  
`{`  
 `x = new int[n];`  
`}`  
`};`

```
c) class C3 { // #include <fstream>
    std::ifstream f; // eine Klasse der C++-Standardbibliothek
public:
    C3(const char* FileName)
    {
        f.open(FileName);
    }
};
```

3. Definieren Sie die folgenden Klassen. Jede soll geeignete Konstruktoren sowie bei Bedarf auch einen Destruktor enthalten. Legen Sie mit jedem Konstruktor der unter a) bis c) definierten Klassen zwei Objekte an. Das erste soll durch eine Definition und das zweite mit *new* angelegt werden. Rufen Sie jede Funktion, die Sie geschrieben haben, für jedes dieser Objekte auf.

a) Die Klasse *Kreis* soll einen Kreis darstellen und als *private* Datenelement den Radius (Datentyp *double*) enthalten. Ein Konstruktor und die Elementfunktion *setzeRadius* sollen einen Parameter des Datentyps *double* haben, der den Radius setzt. Der Konstruktor soll auch ohne ein Argument aufgerufen werden können und dann den Radius auf 1 setzen. Die Elementfunktion *Radius()* soll den Radius als Funktionswert zurückgeben. Alle Elementfunktionen von *Kreis* sollen innerhalb der Klasse definiert werden.

b) Die Klasse *Quadrat* soll ein Quadrat darstellen und als *private* Datenelement die Seitenlänge (Datentyp *double*) enthalten. Ein Konstruktor und die Elementfunktion *setzeSeitenlaengen* sollen einen Parameter des Datentyps *double* haben, der die Seitenlänge setzt. Der Konstruktor soll auch ohne ein Argument aufgerufen werden können und dann die Seitenlänge auf 1 setzen. Die Elementfunktion *Seitenlaenge()* soll die Seitenlänge als Funktionswert haben. Alle Elementfunktionen sollen außerhalb der Klasse definiert werden.

c) Die Klasse *Rechteck* soll ein Rechteck darstellen und als *private* Datenelemente die Seitenlängen *a* und *b* (Datentyp *double*) enthalten, die durch einen Konstruktor initialisiert werden. Diese sollen auch mit der Funktion *setzeSeitenlaengen* gesetzt werden können, die zwei Parameter des Datentyps *double* hat. Die jeweiligen Seitenlängen sollen als Funktionswert der Funktionen *Seitenlaenge\_a()* und *Seitenlaenge\_b()* zurückgegeben werden.

d) Ergänzen Sie jede der unter a) bis c) definierten Klassen um die Elementfunktionen *Flaeche()*, *Umfang()* und *toStr()*. Die Funktion *toStr()* soll einen *string* der Art „Kreis mit Radius 5“ oder „Rechteck mit a=6 und b=7“ zurückgeben.

e) Die Klasse *C2DPunkt* soll wie in den Beispielen einen zweidimensionalen Punkt darstellen. Diese Klasse wird später in zahlreichen Beispielen und Aufgaben zur Darstellung einer Position verwendet. Versuchen Sie, diese Klasse möglichst vollständig zu schreiben, ohne dass diese Anforderungen jetzt schon bekannt sind. Andererseits soll sie auch keine unnötigen Elemente enthalten.

4. a) Welche Ausgabe erzeugt ein Aufruf der Funktion *testI*?

```

void display(string s, int i = -1)
{
    if (i >= 0) s = s + std::to_string(i);
    cout << s << endl;
} // Ohne int-Argument wird nur s ausgegeben

class C {
    int a;
public:
    C(int a_ = 0)
    { // Beim Aufruf ohne Argument ein Standard-
      a = a_;                               // konstruktor
      display("Konstruktor: ", a);
    }
    ~C()
    {
      display("Destruktor: ", a);
    }
};

void f1(C c)
{
    display(" in f1(): Wertparameter");
};

void f2(const C& c)
{
    display(" in f2(): Referenzparameter");
};

C f3(int i)
{
    display(" in f3(): return-Wert");
    return C(i);
};

void test1()
{
    C x(1);
    C* z = new C(2);
    display("vor x=C(3)");
    x = C(3);
    display("vor f1(4)");
    f1(4);
    display("vor f2(x)");
    f2(x);
    display("vor f3(5)");
    x = f3(5);
    delete z;
    display("Ende von test()");
}

```

Vergleichen Sie ihre Vermutungen anschließend mit dem Ergebnis eines Programms, das die Funktion *test1* aufruft.

- b) Wenn Speicher mit *new[]* reserviert wird, muss er mit *delete[]* wieder freigegeben werden. Gibt man mit *new* reservierten Speicher mit *delete[]* wieder frei, ist das Ergebnis undefiniert, ebenso, wie wenn man mit *new[]* reservierten Speicher mit *delete* wieder freigibt. Beschreiben Sie zunächst, welche Ausgabe Sie von einem Aufruf der Funktion *test2* erwarten. Vergleichen Sie Ihre Vermutungen dann mit dem Ergebnis eines Programms, das die Funktion *test2* aufruft.

```
void test2()
{
    display("vor p1");
    C* p1 = new C[2];
    delete[] p1;

    display("vor p2");
    C* p2 = new C[2];
    delete p2;

    display("vor p3");
    C* p3 = new C;
    delete[] p3;

    display("vor p4");
    C* p4 = new C(4);
    delete[] p4;
}
```

5. Definieren Sie für die Klasse *MeinString* eine Elementfunktion *c\_str*. Sie soll wie bei der Stringklasse *string* den Zeiger auf den internen nullterminierten String zurückgeben und damit auch Argumente des Typs *MeinString* bei den Stringfunktionen wie *strcpy* usw. ermöglichen.
6. In der folgenden Klasse soll T ein großer Datentyp sein, bei dem eine Kopie als Wert (wie in dem Kommentar bei *data*) zu lange dauert. Um den Zeitaufwand für die Kopie zu reduzieren, gibt diese als Funktionswert eine Referenz und keine Kopie des Elements x zurück. Beurteilen Sie diesen Ansatz.

```
class C {
    T x;
public:
    C(T x_) { x = x_; }

    T& data() // T data() wäre zu langsam
    {
        return x;
    }
};
```



7. Was halten Sie von dem folgenden Trick, den ich im Internet gefunden habe (<http://home.att.net/~robertdunn/CodeSamples/CheapTricks.html>): „Borland, for some unfathomable reason, decided to make member data private in many classes. Here is a rather clever way to get around it:“

```
#define private public
#define protected public
#include <theworld.h>
#undef private
#undef public
```

### 8.1.6 *shared\_ptr*: Smart Pointer für Klassenelemente

Viele Probleme mit Zeigern werden mit smart pointern vermieden. Diese werden in Kapitel 18 ausführlich beschrieben. Hier soll ein kurzer Überblick die wichtigsten Vorteile von Smart Pointern des Typs *shared\_ptr* aufzeigen. Dieser Datentyp steht nach

```
#include <memory>
using namespace std; // bzw. using std::shared_ptr;
```

zur Verfügung. Dann erhält man mit

```
shared_ptr<int> s = std::make_shared<int>(17); // int* s=new int(17);
shared_ptr<T> t = std::make_shared<T>(); // T* t = new T(); T ein
                                   beliebiger Datentyp mit einem Standardkonstruktor
```

die smart pointer *s* und *t*, die man im Wesentlichen wie die im Kommentar angegebenen Zeiger verwenden kann. Der entscheidende Vorteil eines smart pointers ist aber, dass der zugehörige Speicher nicht explizit mit *delete* freigegeben werden muss, sondern automatisch beim Aufruf des Destruktors freigegeben wird.

Da der automatisch erzeugte Destruktor die Destruktoren aller Datenelemente der Klasse aufruft (siehe Abschnitt 8.1.5, 6.), wird auch der Destruktor eines smart pointer Datenelements aufgerufen. Deshalb muss man für eine Klasse, die nur smart pointer und keine gewöhnlichen Zeiger hat, keinen Destruktor definieren.

Beispiel: Wenn eine Klasse einen Zeiger auf einen dynamischen Speicherbereich enthält, muss man in der Klasse einen Destruktor definieren, der diesen Speicher wieder freigibt:

```
class C
{
    int* p;
public:
    C(int x): p(new int(x)) { }
    ~C() // der Destruktor ist notwendig, da die Klasse einen
        { // Zeiger enthält
            delete p;
        }
};
```

Enthält die Klasse anstelle eines Zeigers dagegen einen smart pointer, muss kein Destruktor definiert werden, da ein smart pointer eine Klasse mit einem Destruktor ist, der den Speicherbereich frei gibt:

```
class D
{
    std::shared_ptr<int> u = std::make_shared<int>();
public:
    D(int x): u(std::make_shared<int>(x)) { }
}; // kein Destruktor notwendig
```

Die Freigabe des Speichers könnte man auch mit einem *unique\_ptr* erreichen. Da für *unique\_ptr* aber keine Zuweisungen möglich sind, könnte man auch keine Variablen des Klassentyps kopieren. Da das aber meist notwendig ist, wählt man für Datenelemente einer Klasse meist *shared\_ptr*.

Bei vielen der folgenden Beispiele können Zeiger durch smart pointer ersetzt werden. Um aber auf die mit Zeigern verbundenen Probleme hinzuweisen, werden trotzdem oft gewöhnliche Zeiger verwendet

### 8.1.7 OO Analyse und Design: Der Entwurf von Klassen

Eine Klasse ist eine Zusammenfassung von Daten und Funktionen. Deshalb liegt es nahe, in einer Klasse solche Variablen und Funktionen zusammenzufassen, die inhaltlich zusammengehören. Das bedeutet aber nicht, dass jede solche Zusammenfassung auch eine „gute“ Klasse ist, die zur Lösung des Problems beiträgt. Deshalb stellt sich die Frage, wie man zu einer gegebenen Problemstellung solche Klassen findet.

Diese Fragen sind Gegenstand der objektorientierten Analyse und des objektorientierten Designs (OOAD). Die folgenden Ausführungen sollen nur einen kleinen Einblick in dieses Thema geben. Für eine ausführlichere Darstellung wird auf Booch (1994), Meyer (1997) und Stroustrup (1997, Kap. 23 und 24) verwiesen.

Die Suche nach den Klassen, die für die Lösung eines Problems angemessen sind, ist meist ein **iterativer Prozess**: In einem ersten Schritt entwickelt man Klassen und Objekte, die eine erste Näherung der Lösung darstellen. Diese wird dann immer weiterentwickelt, bis die Aufgabe gelöst ist. **Booch** (1994, S. 136) gesteht freimütig ein, dass er es **außer in trivialen Fällen nie geschafft hat, eine Klasse auf Anhieb richtig zu entwerfen**.

„Gute“ Klassen sind oft dadurch charakterisiert, dass sie vom Anwender leicht verstanden und vom Entwickler leicht an neue Anforderungen angepasst werden können. Die folgenden Regeln tragen oft dazu bei, „gute“ Klassen zu finden (Booch 1994, Abschnitt 3.6; Meyer 1997, S. 730; Stroustrup 1997, Abschnitt 23.4.2):

1. Eine Klasse soll ein **einziges, klar umrissenes, einfaches Konzept** darstellen

Falls eine Klasse verschiedene Konzepte darstellt, ist beim Aufruf einer Elementfunktion eventuell nicht klar, auf welches der Konzepte sich diese Funktion bezieht. Das führt leicht zu unübersichtlichen Programmen.

## 2. Die **Schnittstelle** einer Klasse soll **vollständig und minimal** sein.

Sie soll für alle Operationen Elementfunktionen enthalten, die ein Anwender für die Lösung des Problems benötigt. Sie soll aber auch keine unnötigen Funktionen haben. Dazu gehören oft Funktionen, die einfache Anweisungen zusammenfassen, die man genauso gut und ohne jeden Verlust an Einfachheit anstelle des Funktionsaufrufs verwenden könnte.

Das verlangt vom Designer bzw. Entwickler Weitsicht und ein Problemverständnis aus der Sicht des Benutzers.

## 3. Jedes Objekt (d.h. jede Variable des Klassentyps) soll ein Objekt der Realität darstellen. Dazu müssen die Datenelemente oft in einer bestimmten Beziehung zu einander stehen. Eine solche Bedingung wird auch als **Konsistenzbedingung** oder als **Klasseninvariante** bezeichnet.

Beispiele:

1. Bei einer Klasse, die ein Kalenderdatum durch drei *int*-Werte für den Tag, den Monat und das Jahr darstellt, ist die Konsistenzbedingung  $1 \leq \text{Monat} \leq 12$  und  $1 \leq \text{Tag} \leq \text{MaxTag}$  (siehe Abschnitt 8.1.3).
2. Da ein Punkt der Ebene beliebige Koordinaten aus dem Wertebereich von *double* haben kann, stellt jede Kombination von Koordinaten *x* und *y* eines Objekts der Klasse *C2DPunkt* einen Punkt dar. Man sagt dann auch, dass die Konsistenzbedingung immer erfüllt, d.h. *true* ist.
3. Ein Objekt der Klasse

```
class MeinString {
    char* s; // Zeiger auf nullterminierten String
    int n;   // Länge des Strings
public:
    // ...
};
```

ist in einem inkonsistenten Zustand, wenn *s* nicht auf einen reservierten Speicherbereich mit *n*+1 Zeichen ( $n \geq 0$ ) zeigt, bei dem das letzte Zeichen der Nullterminator '\0' ist. Die auf Seite 384 vorgestellten Konstruktoren der Klasse *MeinString* sind so implementiert, dass man unmittelbar sieht, dass sie die Klasseninvariante herstellen:

```
class MeinString {
    // Klasseninvariante I: s zeigt auf einen reservier-
    // ten Speicherbereich mit n+1 Zeichen, wobei das
    // letzte Zeichen der Nullterminator ist.
    char* s;
    int n;
public:
```

```

MeinString(const char* p)
{ // Vorbedingung: p zeigt auf einen nullterminierten
  n = strlen(p); // String
  s = new char[n + 1];
  strcpy(s, p);
}; // I

MeinString(char c)
{ // keine besondere Vorbedingung notwendig
  n = 1;
  s = new char[n + 1];
  *s = c;
  *(s + 1) = '\0';
}; // I
};

```

Solche Konstruktoren findet man für viele Klassen. Wenn man die Klasseninvariante formuliert hat, ist es oft leicht, die Konstruktoren so zu schreiben, dass sie hergestellt wird.

4. Damit die Klasse *Kreis* einen Kreis darstellt, liegt die Bedingung Radius  $r \geq 0$  nahe. Falls ein solcher Kreis in einem Grafikprogramm verwendet wird, bei dem man den Radius durch Ziehen am Rand über den Mittelpunkt hinaus verändern kann, ist eventuell auch ein negativer Radius sinnvoll.
5. Während der Ausführung einer *public* Elementfunktion, nach einer *private* oder *protected* Elementfunktion und nach der Ausführung des Destruktors muss die Konsistenzbedingung nicht gelten.

Wenn z.B. die Datenelemente *Tag\_* und *Monat\_* bei der Klasse *Datum\_2* (siehe Abschnitt 8.1.3) die konsistenten Werte 1 und 2 haben, und die Funktion *setze* mit den konsistenten Argumenten 31 und 1 für *Tag* und *Monat* aufgerufen wird, ist die Konsistenzbedingung nach der Ausführung der ersten Anweisung verletzt:

```

// Tag==1, Monat==2, Tag==31, Monat=1
Tag_ = Tag;
// Tag==31, Monat==2, Tag==31, Monat=1
Monat_ = Monat;

```

Deshalb kann man beim Aufruf einer Elementfunktion in einer Elementfunktion die Konsistenzbedingung nicht immer voraussetzen.

Dass ein Objekt keine **Konsistenzbedingungen** verletzt, erreicht man mit

- Konstruktoren, die die Konsistenzbedingung herstellen oder eine Exception auslösen, falls die Argumente kein konsistentes Objekt konstruieren
- *private* Datenelementen, auf die nur mit *public* Elementfunktionen zugegriffen wird, die diese Bedingungen herstellen (**Datenkapselung**, siehe Abschnitt 8.1.3)
- Elementfunktionen, die die Datenelemente nie in einen inkonsistenten Zustand bringen

Die **Namen** der Klassen und ihrer Elemente sollten immer so gewählt werden, dass sie ihre Bedeutung beschreiben (z.B. *x* für die x-Koordinate). Diese Empfehlung ist aber sehr allgemein und lässt sich in vielen Varianten umsetzen, die meist noch weitere Ziele verfolgen, wie z.B. Namenskonflikte von Datenelementen und Elementfunktionen zu vermeiden:

- Früher wurde oft empfohlen, alle Namen von Datenelementen mit „m“ oder „m\_“ zu beginnen (also *mx* oder *m\_x* für die x-Koordinate). Da solche Namen aber oft die Lesbarkeit mindern, wird in neueren Richtlinien meist von solchen Namen abgeraten. Solche Namen werden im Folgenden nicht verwendet.
- Oft werden für Datenelemente Namen empfohlen, die mit „\_“ enden, wie z.B. *x\_*.
- In UML (UML 2005) beginnen die Namen von Datenelementen und Elementfunktionen mit einem Kleinbuchstaben.
- Microsoft verwendet in seiner .NET Bibliothek für die Datenelemente Namen, die mit einem Kleinbuchstaben beginnen (z.B. *textBox1*). Die Namen von Elementfunktionen beginnen dagegen immer mit einem Großbuchstaben (z.B. *AppendText*).
- Die strikte Umsetzung von englischen Namensrichtlinien führt wegen der unterschiedlichen Groß- und Kleinschreibung in der deutschen Sprache oft zu sperrigen Begriffen. Deswegen wird auch empfohlen, für alle Klassen und Klassenelemente englische Namen zu wählen.

Für welche Varianten Sie sich entscheiden ist nicht so wichtig. Das oberste Ziel sollte aber auf jeden Fall die **Verständlichkeit** des Programms und eine einheitliche Namensgebung sein.

Da Klassen und Objekte in einem Programm meist Konzepte und Objekte der Realität darstellen, die in der Umgangssprache mit Substantiven bezeichnet werden, wird oft empfohlen (z.B. Meyer 1997, S. 727 und S. 881; Booch, 1994, S. 164),

- für die Namen von Klassen und Objekten Substantive zu verwenden.

Die Empfehlungen für die grammatikalische Kategorie von Namen für Elementfunktionen ergeben sich meist aus dem Rückgabetyt:

- Verben für die Namen von Funktionen, die für eine Aktion stehen (Rückgabetyt *void*).
- Adjektive für Namen von Funktionen mit einem booleschen Rückgabewert.
- Substantive für die Namen von Funktionen, die einen Wert zurückgeben.

Allerdings werden diese Empfehlungen nicht überall befolgt: In der UML wird der erste Buchstabe eines Klassennamens groß und der von Attributen und Elementfunktionen klein geschrieben.

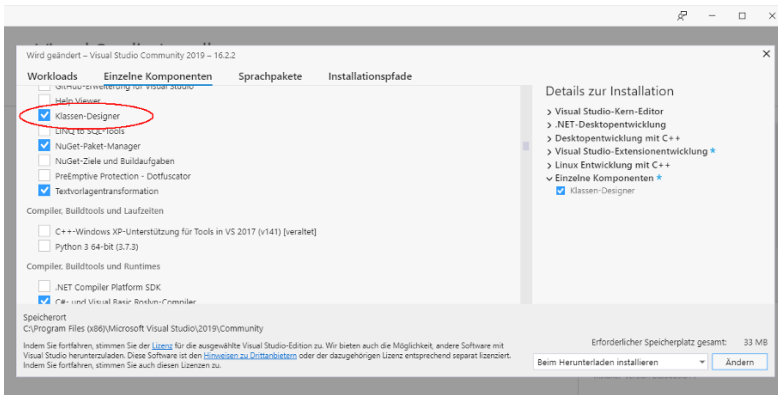
Beispiel: Alle in den bisherigen Beispielen und Aufgaben mit aussagekräftigen Namen bezeichneten Klassen stellen ein Konzept der Realität dar:

*C2DPunkt, Kreis, Rechteck, MeinString* usw.

Dagegen sollen die mit Namen wie *C*, *D* usw. bezeichneten Klassen lediglich Sprachelemente von C++ illustrieren.

### 8.1.8 Klassendiagramme

In Visual Studio 2019 kann man in C++-Projekten Klassen durch **Klassendiagramme** darstellen, wenn man zuvor den Klassen-Designer installiert:



Das sind im Wesentlichen UML-Diagramme. Diese Diagramme sind oft übersichtlicher als der Quelltext, insbesondere wenn es um die Beziehungen zwischen den Klassen in einer Klassenhierarchie geht.

Solche Diagramme für alle Klassen einer Datei erhält man im Kontextmenü der Datei im Projektmappen-Explorer mit *Klassendiagramm anzeigen*. Diagramme für einzelne Klassen erhält man über das Kontextmenü der Klassenansicht (*Ansicht|Klassenansicht*).

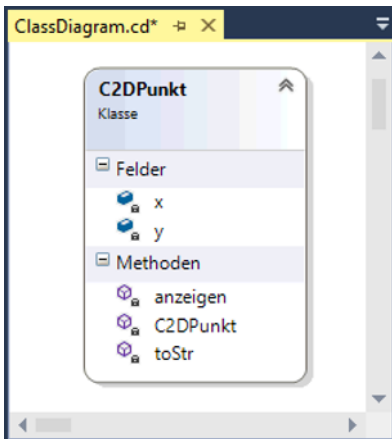
So erhält man zum Beispiel für die Klasse

```
class C2DPunkt {
    double x, y;
public:
    C2DPunkt(double x_, double y_)
    {
        x = x_;
        y = y_;
    };

    string toStr()
    {
        return "(" + std::to_string(x) + "|" + std::to_string(y) + ")";
    } // z.B. (2,345|3,45678)

    void anzeigen()
    {
        cout << toStr() << endl;
    }
};
```

dieses Diagramm:



Unterhalb des Klassendiagramms (bzw. über das Kontextmenü oder über *Ansicht|Weitere Fenster|Klassendetails*) werden die Klassendetails angezeigt:

| Klassendetails - C2DPunkt |      |        |              |                 |                          |
|---------------------------|------|--------|--------------|-----------------|--------------------------|
|                           | Name | Typ    | Modifizierer | Zusammenfassung | Ausblenden               |
| Methoden                  |      |        |              |                 | <input type="checkbox"/> |
| anzeigen                  |      | void   | public       |                 | <input type="checkbox"/> |
| C2DPunkt                  |      |        | public       |                 | <input type="checkbox"/> |
| { x_                      |      | double |              |                 |                          |
| , y_                      |      | double |              |                 |                          |
| }                         |      |        |              |                 |                          |
| toStr                     |      | string | public       |                 | <input type="checkbox"/> |
| Felder                    |      |        |              |                 | <input type="checkbox"/> |
| x                         |      | double | private      |                 | <input type="checkbox"/> |
| y                         |      | double | private      |                 | <input type="checkbox"/> |

Seit Visual Studio 2017 ist es im Unterschied zu typischen UML-Tools nicht möglich (auch nicht in der Enterprise Version), Klassen grafisch entwerfen und daraus C++-Quellcode erzeugen.

### Aufgabe 8.1.8

Erzeugen Sie von Ihren Lösungen der Aufgaben 8.1.5 Klassendiagramme.

#### 8.1.9 Initialisierungslisten für Variablen, Argumente und Rückgabewerte

Mit Initialisierungslisten kann man Werte verschiedenster Datentypen mit einer einheitlichen Syntax angeben. Das gilt nicht nur für elementare Datentypen (siehe Abschnitt 2.3.4), sondern auch für Klassen. Wenn der Compiler einen Ausdruck eines Klassentyps erwartet, kann für den Ausdruck eine Initialisierungsliste mit Argumenten für einen Konstruktor angegeben werden. Das ist z.B. bei

- der Definition von Variablen
- der Übergabe von Argumenten an eine Funktion oder einen Konstruktor
- einer *return*-Anweisung
- einem Elementinitialisierer (siehe Abschnitt 8.2.2)

möglich. Eine leere Liste führt bei einer Klasse zum Aufruf des Standardkonstruktors, bei einem numerischen Typ zum Wert 0 und bei *bool* zum Wert *false*.

Beispiel: Bei der Definition einer **Variablen** des Klassentyps

```
class C {
public:
    C() {};
    C(int x, int y) {};
};
```

können die Argumente für den Konstruktor in einer Initialisierungsliste angegeben werden:

```
C c1{ 1,2 };    // wie "C c1(1, 2);"
C c2 = { 1,2 }; // wie "C c2 = C(1, 2);"
```

Eine leere Initialisierungsliste

```
C c3{};        // Aufruf des Standardkonstruktors
C c4 = {};      // Aufruf des Standardkonstruktors
```

führt zum Aufruf des Standardkonstruktors, während eine leere Liste mit runden Klammern ein Fehler ist:

```
C c3(); // Fehler: ein Funktionsprototyp - most vexing parse
```

Ein **Argument** für einen Parameter eines Klassentyps

```
void f1(C c) {}
```

kann mit einer Initialisierungsliste mit Argumenten für einen Konstruktor übergeben werden:

```
f1({ 1,2 });
```

Eine Initialisierungsliste kann auch nach **return** angegeben werden

```
C f2(int x, int y) { return{ x,y }; }
```

oder als **Default-Argument**:

```
void f3(C c = { 1,2 }) {}
void f4(C c = C(1,2)) {} // Schreibweise von C++03
```



In einer Initialisierungsliste können nicht nur Argumente für einen Konstruktor, sondern auch *public* Elemente angegeben werden. Elemente einer Basisklasse können in verschachtelten geschweiften Klammern angegeben werden.

Beispiel: Ein Objekt der Klasse D

```
struct C { std::string name; };
struct D :public C { int Alter; };
```

kann mit einer verschachtelten

```
D d{ { std::string("ich") }, 1 };
```

### 8.1.10 Initialisierungslisten als Parameter

Damit man einer Funktion oder einem Konstruktor als Argument eine Initialisierungsliste übergeben kann, muss man einen Parameter des nach

```
#include <initializer_list>
```

verfügbaren Typ `std::initializer_list<T>` übergeben.

Beispiel: Die Funktion

```
int sum(std::initializer_list<int> args)
{
    int sum = 0;
    for (auto i=args.begin(); i<args.end(); i++)
        sum += *i;
    // einfacher:
    for (const auto& i : args)
        sum += i;
    return sum;
}
```

kann man folgendermaßen aufrufen:

```
int sum1 = sum({ 1 });           // sum1=1
int sum2 = sum({ 1,2,3 });       // sum2=6
int sum3 = sum({ 1,2,3,4,5 });   // sum3=15
```

Die Container der Standardbibliothek haben alle Konstruktoren mit Parametern des Typs `std::initializer_list<T>`. Ein solcher Konstruktor wird auch als **Sequenzkonstruktor** bezeichnet. Ein Sequenzkonstruktor hat eine höhere Priorität als ein klassischer Konstruktor.

Beispiel: Deshalb können diese mit einer beliebigen Anzahl von Argumenten initialisiert werden. Jedes Argument wird dann als Element in den Container eingefügt:

```
vector<int> v3{ 1, 3, 5 };
vector<double> v4 = { 1, 3, 5 };
```

In älteren Versionen von C++ musste jedes Element mit *push\_back* eingefügt werden, oder die Elemente aus einem Array übernommen werden.

Falls eine Klasse wie *vector* einen Konstruktor mit zwei *int*-Werten hat, besteht ein Unterschied zwischen einer Initialisierung mit runden und geschweiften Klammern:

```
std::vector<int> vec1(2, 3); //zwei Elemente mit dem Wert 3
std::vector<int> vec2{ 2,3 };// die Elemente 2 und 3
```

Diesen spitzfindigen Unterschied gibt es aber nur bei wenigen Klassen.

Initialisierungslisten können auch verschachtelt werden.

Beispiel: Ein zweidimensionaler Vektor ist ein Vektor, der Vektoren enthält:

```
std::vector<vector<int>> v = { {1,2,3},{1,2} };
```

Die Elemente von

```
std::map<int, vector<std::string>> m = { {1,{"a"}},
                                         { 2,{ "bb", "ccc" } } };
```

sind Wertepaare aus einem *int*- und einem *vector<string>*-Wert.

Wenn man eine **Klasse schreiben** will, so dass man Objekte dieser Klasse mit einer beliebigen Anzahl von Argumenten initialisieren kann, verwendet man einen Sequenzkonstruktor.

Beispiel: Objekte der Klasse

```
class MeinVektor2 {
    int* p;
    size_t size;
public:
    MeinVektor2(std::initializer_list<int> seq) // #include
    {                                           // <initializer_list>
        size = seq.size();
        p = new int[size];
        // entweder wie oben in sum mit einer for-Schleife oder
        std::uninitialized_copy(seq.begin(), seq.end(), p);
    }
};
```

können mit einer beliebigen Anzahl von Elementen initialisiert werden:

```
MeinVektor2 v2a{};
MeinVektor2 v2b{1};
MeinVektor2 v2c{1,2,3};
MeinVektor2 v2d{1,2,3,4,5,6,7};
```

### 8.1.11 Implizite Typzuweisungen mit *auto*

Schon in Abschnitt 2.3.3 wurde kurz darauf hingewiesen, wie man mit *auto* den Datentyp einer Variablen vom Compiler ableiten lassen kann. Im Folgenden wird gezeigt, dass man *auto* auch mit Klassen, Zeigern, Referenzen usw. verwenden kann. Dabei geht der Compiler nach denselben Regeln wie bei Templates vor.

Gibt man bei der Definition einer globalen oder lokalen Variablen mit einem Initialisierer anstelle eines Datentyps das Schlüsselwort ***auto*** an, ersetzt der Compiler *auto* durch einen Datentyp, der aus dem des Initialisierers abgeleitet wird. Oft ist das der Datentyp des Initialisierers. Da der Compiler den Datentyp selbst ableitet, spricht man auch **Typ-Inferenz** oder von **impliziten Typzuweisungen**.

Beispiel: Da der Initialisierungsausdruck 17 in

```
auto i = 17; // wie int i = 17;
```

den Datentyp *int* hat, ersetzt der Compiler *auto* durch *int*. Die Variable *i* erhält so den Datentyp *int*. Der Initialisierungsausdruck kann auch eine Variable oder ein beliebiger Ausdruck sein:

```
auto k = i; // k hat denselben Datentyp wie i
```

Ohne einen Initialisierungsausdruck führt *auto* zu einer Fehlermeldung des Compilers:

```
auto i ; // Fehler: Initialisierer erforderlich
```

Bei der Definition eines Datenelements kann *auto* aber nicht verwendet werden:

```
class C {
    auto i = 17; // Fehler: "auto" ist hier nicht zulässig
```

Die Verwendung von *auto* bedeutet nicht, dass die Variable keinen oder einen universellen Datentyp wie in typlosen Sprachen hat. Vielmehr hat sie genau den Datentyp, den der Initialisierer hat.

Implizite Typzuweisungen bringen bei einfachen Datentypen wie *int* auf den ersten Blick keinen großen Vorteil: Die Reduzierung des Schreibaufwands ist minimal, und dass der Datentyp der Variablen nicht explizit da steht, macht das Programm nicht immer leichter verständlich. Trotzdem ist die Verwendung von *auto* oft vorteilhaft:

- Da *auto* einen Initialisierer verlangt, kann die Initialisierung einer Variablen nicht vergessen werden.
- Wenn der Datentyp der des Initialisierers ist, werden unbeabsichtigte Konvertierungen vermieden.
- Definiert man eine Variable mit *auto* und einem Initialisierer *i*, der selbst eine Variable ist, wird bei einer Änderung des Datentyps von *i* der der Variablen automatisch angepasst.

- Bei komplexeren Datentypen (z.B. den Iterator-Klassen der Container-Klassen, siehe Abschnitt 11.1.2) kann *auto* die Schreibarbeit reduzieren.
- In Templates und Lambda-Ausdrücken kann *auto* die einzige Möglichkeit sein, einen Datentyp zu bestimmen.

Deswegen ist es oft empfehlenswert, *auto* gegenüber einer expliziten Typangabe zu bevorzugen.

*auto* kann in weiteren **syntaktischen Varianten** verwendet werden. In den folgenden Beispielen steht C für eine Klasse und c für eine Variable des Typs C:

```
class C {};  
C c;
```

In allen diesen Beispielen ist der abgeleitete Typ der Datentyp des Initialisierungsausdrucks:

- Bei einer Initialisierung mit runden Klammern wie in

```
auto d(c); // wird auf "auto d = c;" zurückgeführt
```

wird *auto* durch den Datentyp des Ausdrucks in den Klammern ersetzt.

- Bei einer Initialisierung mit einem Gleichheitszeichen

```
auto d = c; // wird auf "auto d = c;" zurückgeführt
```

wird *auto* durch den Datentyp rechts vom Gleichheitszeichen ersetzt. Das gilt auch für einen new-Ausdruck.

```
auto p = new C(); // wie C* p = new C()
```

- Mehrfachdeklarationen sind nur dann möglich, wenn jeder Initialisierer denselben Datentyp hat.

```
auto a = 1, b = 2; // Das geht  
auto a = 1, b = 3.14; // Fehler
```

Das ermöglicht dann Definitionen wie

```
vector<int> v;  
for (auto i = v.begin(), e = v.end(); i != e; i++)
```

- Bei Initialisierungslisten ohne *auto* haben x1 und x2 nach

```
int x1 = { 17 }; // wie int x1 = 17;  
int x2 = 17;
```

denselben Wert.

Vor C++17 wurde mit *auto* und Initialisierungslisten oft der Datentyp *std::initializer\_list* (siehe Abschnitt 8.1.10) abgeleitet, obwohl der Typ in der Liste intuitiver gewesen wäre. Diese Regeln wurden inzwischen geändert:

- Bei einer Initialisierung mit *auto* und ohne ein Gleichheitszeichen (eine sogenannte *direct list initialization*) darf seit C++17 nur noch ein Wert zwischen den geschweiften Klammern stehen. Von *auto* wird dann der Datentyp dieses Wertes abgeleitet.

```
auto s{ 0 }; // vor C++17 std::initializer_list<int>, jetzt int
auto a{ 0,1 }; // vor C++17 std::initializer_list<int>, jetzt Fehler
```

- Bei einer Initialisierung mit *auto* und mit einem Gleichheitszeichen (eine sogenannte *copy list initialization*) können mehrere Werte angegeben werden. Diese müssen alle denselben Datentyp haben:

```
auto b={ 0,1 }; // vor und nach C++17 std::initializer_list<int>
```

Vor C++17 war der Datentyp von allen diesen Ausdrücken *std::initializer\_list*.

- In einer Funktion kann der **Rückgabotyp** aus dem Datentyp des Ausdrucks nach *return* abgeleitet werden. Falls die Funktion mehrere *return*-Anweisungen enthält, muss der Rückgabotyp bei allen gleich sein.

```
auto max(int x, int y)
{
    if (x < y) return y;
    else return x;
}
```

Würde man hier die Parameterliste zu

```
auto max(int x, double y)
```

ändern, wäre eine Fehlermeldung des Compilers die Folge.

- Mit einem sogenannten **nachstehenden Rückgabotyp** kann man aber den Rückgabotyp vorgeben. Dazu gibt man nach der Parameterliste *->* und einen Datentyp an. Dann verwendet der Compiler den nach *->* angegebenen Datentyp. Ergänzt man die letzte Funktionsdefinition von *max* zu

```
auto max(int x, double y) -> double
```

wird diese Funktion kompiliert.

- Mit *auto* wird auch der Datentyp einer Funktion abgeleitet, wenn man als Initialisierer den Namen einer Funktion angibt. Mit der Funktion

```
int plus1(int x) { return x + 1; }
```

ist

```
auto fp = plus1; // ein Funktionszeiger, wie int (*fp)(int);
```

ein Funktionszeiger, dem man auch eine andere Funktion mit der passenden Signatur zuweisen kann.

Im Visual Studio Editor zeigt Intellisense die abgeleiteten Datentypen an:

```
class C {};  
C* pc = new C{ };  
auto p{ pc };  
C*p
```

Der Datentyp des Initialisierers kann auch ein Zeiger, eine Referenz usw. sein. Das soll für verschiedene Datentypen eines Initialisierers `t` an Beispielen

```
auto x = t; // Datentyp von t: T
```

illustriert werden. Der Datentyp von `t` wird hier mit `T` bezeichnet.

Falls der Datentyp von `t` weder `const`, noch `&` noch `&&` enthält, ersetzt der Compiler das Wort „auto“ durch `T`. Falls der Datentyp `const` oder `&` oder `&&` enthält, werden diese weggelassen.

Beispiel: Mit den Definitionen

```
int i = 17;  
int* pi = &i;
```

erzeugt der Compiler die als Kommentar angegebenen Datentypen:

```
auto ai = i; // wie "int ai = i;"  
auto api = pi; // wie "int* api = pi;"
```

Bei einem Werttyp gehört `const` nicht zum Datentyp, bei einem Zeiger dagegen schon. Mit

```
const int ci = 19;  
const int* cpi = &i;
```

erzeugt der Compiler die als Kommentar angegebenen Datentypen:

```
auto aci = ci; // wie "int aci = ci;"  
auto acpi = cpi; // wie "const int* acpi = cpi;"
```

Wenn der Datentyp von `t` eine Referenz `T&` ist, wird "auto" durch `T` und nicht durch `T&` ersetzt.

Beispiel: Mit dem Referenztyp von `ri`

```
int& ri = i; // i aus dem letzten Beispiel
```

erzeugt der Compiler für `ar` keine Referenz:

```
auto ar = ri; // wie "int ar = ri;" - nicht int& ar = ri; !!!
```

Das sieht man auch daran, dass der Wert von `i` nach diesen Zuweisungen 20 und nicht 21 ist:

```
int& r2 = ri;
r2 = 20; // i = 20
ar = 21; // i = 20
```

Dieses auf den ersten Blick unerwartete Ergebnis ist aber ohne große praktische Bedeutung, da Variablen eines Referenztyps nur selten verwendet werden.

`auto` kann auch zusammen mit `*`, `&`, `const` und `constexpr` zur Definition von Zeigern, Referenzen und Konstanten verwendet werden.

- Bei **`auto*`** muss der Initialisierer ein Zeiger sein. Falls sein Datentyp `T*` ist, wird `auto` durch `T` ersetzt.
- Bei **`auto&`** muss der Initialisierer ein L-Wert sein. Falls sein Datentyp `T` ist, wird `auto` durch `T` ersetzt.
- Bei **`constexpr auto`** muss der Initialisierer eine Compile-Zeit Konstante sein. Falls sein Datentyp `T` ist, wird `auto` durch `T` ersetzt.

Beispiel: Mit `pi` und `i` aus dem Beispiel oben erhält man

```
auto* ap = pi;           // wie "int* ap = pi;"
auto* api = i; // Fehler: Der Typ kann nicht hergeleitet werden
```

Mit `auto` kann auch `constexpr` verwendet werden:

```
constexpr auto ce1 = 17; // wie "constexpr int ce1 = 17;"
constexpr auto ce2 = ce1; // wie "constexpr int ce2 = 17;"
```

Die Verwendung von `auto` als Speicherklassen-Spezifizierer wie in C ist nicht mehr möglich und wird vom Compiler als Fehler betrachtet.

Beispiel: Die Definition

```
auto int x; // Fehler
```

wird vom Compiler nicht akzeptiert. Da `auto` in dieser Form aber schon lange kaum noch verwendet wird, dürfte das nicht zu größeren Problemen führen.

## Aufgabe 8.1.11

1. Nach

```
int i = 17;
int* pi = &i;
const int ci = 19;
const int* cpi = &i;
```

```
int fii(int x) { return 0; }
```

sollen die folgenden Anweisungen im Programm stehen. Welche werden vom Compiler akzeptiert, und welchen Datentyp erhält die Variable dabei?

```
auto    a;
auto    b = &i;
b = 19;
auto    c(i);
c = 20;
auto    d { i };
d = 21;
auto    e = fii(0);
auto    f = fii;
f = 23;
f(24);
auto    g = new int(25);
g = 26;
auto    h = ci;
h = 27;
const auto j = i;
constexpr auto k = j;
```

2. Wenn man in älteren Versionen von C++ erreichen wollte, dass verschiedene Variablen denselben Datentyp haben, und dieser Datentyp einfach durch eine einzige Änderung geändert werden kann, hat man oft mit *typedef* einen neuen Namen für diesen Datentyp definiert.

```
typedef char MeinTyp; // char soll eventuell zu wchar_t geändert
                        werden
MeinTyp v1 = 'x';
MeinTyp v2;
```

Wie lässt sich das in C++11 vereinfachen?

## 8.2 Klassen als Datentypen

Beim Entwurf von C++ wurde nicht nur das Ziel verfolgt, mit Klassen und den Konzepten der objektorientierten Programmierung neue Datentypen definieren zu können. Vielmehr sollen Klassen einem Programmierer auch „die Möglichkeit geben, neue Datentypen zu schaffen, die genauso wie die eingebauten Datentypen verwendet werden können“ (Stroustrup, 1997, Abschnitte 10.1 und 10.3).

Selbstverständlich ist es schwierig, eine klare Grenze zwischen diesen beiden Zielen zu ziehen, da sie eng miteinander verwoben sind. Verzichtet man aber auf eine solche Differenzierung, entsteht bei einigen Sprachelementen der Eindruck, als ob sie etwas mit objektorientierter Programmierung zu tun hätten, obwohl das nicht zutrifft.



Deshalb wurde das Thema „Klassen“ in diesen und den letzten Abschnitt unterteilt. Ein Vergleich mit anderen objektorientierten Sprachen zeigt, dass man die Konzepte des letzten Abschnitts in allen diesen Sprachen findet. Für die Konzepte aus diesem Abschnitt findet man aber oft keine Entsprechungen.

### 8.2.1 Der Standardkonstruktor

Ein Konstruktor, der ohne Argumente aufgerufen werden kann, wird als **Standard-konstruktor** oder auch als **Default-Konstruktor** bezeichnet. Der Standardkonstruktor einer Klasse C wird dann bei der Definition eines Objekts aufgerufen, wenn dem Objekt wie in

```
C c; // initialisiert c mit dem Standardkonstruktor
C c{}; // initialisiert c mit dem Standardkonstruktor
```

keine Argumente übergeben werden. Diese erste Schreibweise entspricht allerdings nicht dem üblichen Schema, nach dem eine Funktion ohne Parameter mit einem leeren Paar runder Klammern aufgerufen wird:

```
C c(); // Funktionsdeklaration, keine Definition eines Objekts
```

Im C++-Standard ist ausdrücklich festgelegt, dass diese Schreibweise als Funktionsdeklaration und nicht als Definition eines Objekts (einer Variablen) interpretiert wird. Wenn ein Objekt dagegen mit *new* erzeugt wird, ist es ohne Bedeutung, ob die Klammern angegeben oder weggelassen werden:

```
C* p = new C; // Diese beiden Definitionen
C* q = new C (); // sind gleichwertig
```

Ein Standardkonstruktor kann ein Konstruktor **ohne Parameter** oder einer **mit Default-Argumenten** sein:

```
struct C {
    C() { } // Standardkonstruktor
};

struct C1 {
    C1(int i = 0, int j = 0) { } // Standardkonstruktor
};
```

Bei der schon früher betrachteten Stringklasse *MeinString* wird man normalerweise erwarten, dass der String *s* nach der Definition

```
MeinString s;
```

ein leerer String ist. Das erreicht man durch den einen Standardkonstruktor, der Platz für ein einziges Zeichen reserviert, das dann den Nullterminator '\0' erhält:

```
class MeinString {
    char* s;
    int n; // Länge des Strings
```

```

public:
    MeinString()
    {
        n = 0;
        s = new char[n + 1];
        *s = '\0';
    } // Stellt die Klasseninvariante her (siehe Abschnitt 8.1.7)
};

```

Definiert man für eine Klasse keinen Konstruktor, **erzeugt** der **Compiler** einen **Standardkonstruktor**, wenn dieser benötigt wird. Er ist eine *public inline* Funktion mit einem leeren Anweisungsteil. Für eine Klasse C ohne einen Konstruktor erzeugt der Compiler also den Standardkonstruktor

```

C::C() { };

```

Deshalb kann man ein Objekt der Klasse C folgendermaßen definieren:

```

C c;

```

Falls eine Klasse jedoch einen oder mehrere Konstruktoren enthält, erzeugt der Compiler keinen Standardkonstruktor. Deshalb wird für die Klasse

```

struct C {
    C(int i) { }
};

```

die folgende Definition vom Compiler zurückgewiesen:

```

C c; //error: Kein geeigneter Standardkonstruktor verfügbar

```

In C++11 wurde die Option aufgenommen, einen **Standardkonstruktor** auch dann vom Compiler erzeugen zu lassen, wenn die Klasse andere Konstruktoren hat. Das wird mit der Angabe „*=default*“ erreicht. Außerdem wurde die Option aufgenommen, mit „*=delete*“ die Erzeugung des Standardkonstruktors durch den Compiler zu unterbinden. Siehe dazu Abschnitt 8.2.8.

Ein **Standardkonstruktor** wird immer dann aufgerufen, wenn sich aus der Definition eines Objekts nicht ergibt, dass ein anderer Konstruktor aufgerufen werden soll. Dadurch wird gewährleistet, dass jedes Objekt durch einen Konstruktoraufruf initialisiert wird. Das gilt insbesondere auch dann,

- wenn ein Array von Objekten ohne Initialisierungsliste definiert wird oder
- wenn ein Objekt in einer Klasse enthalten ist, deren Konstruktor keinen Elementinitialisierer (siehe Abschnitt 8.2.2) für dieses Objekt enthält.

Wir werden später im Zusammenhang mit virtuellen Funktionen sehen, wie wichtig die Initialisierung eines Objekts mit solchen Funktionen durch einen Konstruktor ist.

Der aufgerufene Konstruktor wird anhand der Argumente bestimmt, die bei der Definition des Objekts als Initialisierer angegeben werden. Die Definition eines Objekts ohne solche Argumente führt zum Aufruf des Standardkonstruktors. Deshalb ist ein **Standardkonstruktor immer dann notwendig**, wenn man ein Objekt ohne Argumente für einen Konstruktor definiert.

Beispiel: Da die Klasse C keinen Standardkonstruktor hat,

```
struct C {
    C(int n) {};
};

class D {
    C e;
};
```

sind die folgenden Definitionen nicht zulässig:

```
C a[5]; // error: Kein geeigneter Standard-
        // konstruktor verfügbar
D d;    // error: Kein geeigneter Standard-
        // konstruktor verfügbar
```

Erweitert man C um einen Standardkonstruktor, sind sie zulässig.

### 8.2.2 Elementinitialisierer

Klassen werden oft als Bausteine für weitere Klassen verwendet, z.B. als Datentyp von Elementen. Im Folgenden wird gezeigt, wie man Datenelemente eines Klassentyps mit ihrem Konstruktor initialisieren kann.

Wenn eine Klasse C wie in

```
class C { // enthält ein Element e eines Klassentyps E
    E e;  // führt zum Aufruf des Standardkonstruktors
public:
    C(int n) { };
};
```

ein **Element** eines Klassentyps enthält, für das nicht festgelegt ist, wie es bei der Definition eines Objekts der Klasse C initialisiert werden soll, wird es automatisch mit dem Standardkonstruktor von E initialisiert. Meist will man das Element e jedoch mit einem anderen Wert als dem initialisieren, der sich mit dem Standardkonstruktor ergibt. Das ist mit dem Aufruf eines entsprechenden Konstruktors von E im Konstruktor von C möglich:

```
class C { // initialisiert e doppelt
    E e;  // führt zum Aufruf des Standardkonstruktors
public:
```

```

C(int n)
{
    e = E(n); // zweiter Aufruf eines Konstruktors für e
};
};

```

Allerdings wird dadurch der automatische Aufruf des Standardkonstruktors nicht unterbunden. Deshalb werden so zwei Konstruktoren für `e` aufgerufen. Dabei ist der erste Aufruf des Standardkonstruktors überflüssig und kostet unnötig Zeit, da der von ihm gesetzte Wert gleich anschließend überschrieben wird.

Den **automatischen Aufruf** des Standardkonstruktors kann man **mit** einem **Konstruktor-initialisierer** (*ctor-initializer*) **verhindern**:

*ctor-initializer:*  
*: mem-initializer-list*

Einen Konstruktorinitialisierer gibt man nach der Parameterliste eines Konstruktors an. Er beginnt mit einem Doppelpunkt, auf den durch Kommas getrennte **Elementinitialisierer** (*mem-initializer*) für jedes zu initialisierende Element folgen:

*mem-initializer-list:*  
*mem-initializer ...opt*  
*mem-initializer-list , mem-initializer ...opt*

*mem-initializer:*  
*mem-initializer-id ( expression-list<sub>opt</sub> )*  
*mem-initializer-id braced-init-list*

*mem-initializer-id:*  
*class-or-decltype*  
*identifizier*

Ein Elementinitialisierer besteht aus dem Namen des zu initialisierenden Elements und einer eventuell leeren Liste von Ausdrücken:

- Wenn der Datentyp des Elements eine Klasse ist, muss diese Liste eine zulässige Liste von Argumenten für einen Konstruktor des Elements sein. Der Elementinitialisierer initialisiert dann das Element mit diesem Konstruktor.
- Ein Element `e` eines skalaren Datentyps kann mit höchstens einem Argument initialisiert werden. Der Ausdruck `e(a)` entspricht dabei einer Zuweisung `e=a` und der Ausdruck `e()` der Zuweisung `e=0`.

Bei Elementinitialisierern können nicht nur runde, sondern auch geschweifte Klammern angegeben werden (Initialisierungslisten, siehe Abschnitt 8.1.9). Das wird vor allem für Datenelemente eines elementaren Datentyps empfohlen, um fehlerhafte Standardkonversionen zu vermeiden.

Beispiel: Der folgende Elementinitialisierer wird nicht kompiliert:

```

class C {
    int i;
public:
    C(double x) :i{ x } {}; // Fehler: einschränkende
                              Konvertierung
};

```

Ein nicht statisches Datenelement einer Klasse wird also folgendermaßen initialisiert:

- Wenn der Datentyp des Elements eine Klasse ist
  - und ein Elementinitialisierer für das Element angegeben ist, wird der entsprechende Konstruktor aufgerufen und **nicht** sein **Standardkonstruktor**.
  - und kein Elementinitialisierer für das Element angegeben ist, wird **automatisch** sein **Standardkonstruktor aufgerufen**. Da ein Elementinitialisierer mit einer leeren Liste von Ausdrücken zum Aufruf des Standardkonstruktors führt, kann man einen solchen Elementinitialisierer ebenso gut auch auslassen.

Deshalb werden alle Elemente einer Klasse, deren Datentyp eine Klasse ist, entweder durch ihren Standardkonstruktor oder den Konstruktor initialisiert, der durch einen Elementinitialisierer aufgerufen wird.

- Wenn der Datentyp des Elements keine Klasse ist
  - und ein Elementinitialisierer für das Element angegeben ist, wird es mit dem Argument des Elementinitialisierers initialisiert. Diese Initialisierung ist gleichwertig mit der Zuweisung des Arguments im Konstruktor.
  - und kein Elementinitialisierer für das Element angegeben ist, wird es nicht initialisiert.

Eine Initialisierung bei der Definition wird vor dem Aufruf eines Konstruktors ausgeführt. Falls ein Datenelement sowohl bei seiner Definition als auch über einen Elementinitialisierer initialisiert wird, hat es anschließend den vom Elementinitialisierer gesetzten Wert.

Beispiel: Das Datenelement `i` erhält den Wert 18:

```

struct C {
    int i = 17;
    C() :i(18){}
};

```

Beim Aufruf eines Konstruktors für eine Klasse `C`, die mehrere Elemente eines Klassentyps enthält, werden zuerst die Elemente initialisiert. Die **Reihenfolge** der Initialisierung ergibt sich aus der Reihenfolge, in der sie in der Klasse definiert werden. Die Reihenfolge ihrer Elementinitialisierer hat darauf keinen Einfluss. **Danach** werden die Anweisungen des **Konstruktors** von `C` ausgeführt. Da die Elemente vor den Anweisungen des Konstruktors initialisiert werden, kann man im Konstruktor von `C` voraussetzen, dass alle Elemente von `C`, deren Datentyp eine Klasse ist, durch einen Konstruktor initialisiert sind. Die **Destruktoren** werden immer in der umgekehrten Reihenfolge der Konstruktoren aufgerufen.

Beispiel: Mit den Klassen

```

class E {
public:

```

```

    E(int n)
    {
        cout << "Konstruktor E " << endl;
    }
};

class C {
    int i;
    double d;
public:
    C(int n) :e(n), i(3), d()
    { // hier kann vorausgesetzt werden, dass e, i
      // und d initialisiert sind
      cout << "Konstruktor C " << endl;
    };
    E e; // führt nicht zum Aufruf des Standard-
}; // konstruktors von E, da e oben angegeben ist

C c(5);

```

erhält man die Ausgabe

```

Konstruktor E
Konstruktor C

```

Die Elemente werden in der Reihenfolge ihrer Definition in der Klasse initialisiert (also zuerst i, dann d und dann e) und nicht in der Reihenfolge ihrer Elementinitialisierer (also nicht zuerst e, dann i und dann d). Da e in der Liste der Elementinitialisierer des Konstruktors von C enthalten ist, wird der Standardkonstruktor für e nicht aufgerufen.

Dieses Beispiel zeigt insbesondere auch, wie ein Argument für einen Konstruktor von C an einen Konstruktor eines Elements weitergegeben wird:

```

C(int n) :e(n), ...

```

Wenn ein Konstruktorinitialisierer aus mehreren Elementinitialisierern besteht, erweckt das bei einem Leser eventuell den Eindruck, dass die Elemente in der Reihenfolge der Elementinitialisierer initialisiert werden. Um dem vorzubeugen, empfiehlt es sich, die **Elementinitialisierer in derselben Reihenfolge wie die Definition der Elemente** aufzuführen:

```

C(int n) :i(3), d(), e(n) {} // Reihenfolge der Definition

```

Ein Konstruktor initialisiert oft nur Datenelemente. Verwendet man dazu Elementinitialisierer, erhält man einen Konstruktor mit einem **leeren Anweisungsteil**.

Definiert man einen Konstruktor außerhalb der Klasse, gibt man die Elementinitialisierer bei der Definition und nicht bei der Deklaration an:

```

C::C(int n) :i(3), d(), e(n) {}

```

Der implizit definierte **Standardkonstruktor** hat einen leeren Anweisungsteil und auch keine Elementinitialisierer. Deshalb werden durch diesen Konstruktor alle Datenelemente der Klasse, deren Datentyp selbst eine Klasse ist, mit ihrem Standardkonstruktor initialisiert.

Beispiel: Die Klasse C soll zwei nicht statische Datenelemente des Typs C1 und C2 und keinen explizit definierten Standardkonstruktor haben:

```
struct C {
    C1 c1;
    C2 c2;
};
```

Dann hat der vom Compiler implizit erzeugte Standardkonstruktor

```
C::C() { };
```

denselben Effekt wie

```
C::C() : c1(), c2() { }
```

Obwohl der implizit erzeugte Standardkonstruktor so aussieht, als ob er nichts tun würde, können mit seinem Aufruf doch umfangreiche und zeitaufwendige Operationen verbunden sein.

### Aufgaben 8.2.2

1. Eine Klasse E soll in einem Standardkonstruktor die Meldung „Standardkonstruktor“ und in einem Konstruktor mit einem *int*-Parameter die Meldung „int-Konstruktor“ ausgeben. Diese Klasse soll als Datentyp der Elemente in

```
class C {
    E e1, e2;
public:
    C() { }
    C(int i) :e1(i) { }
    C(int i, int j) :e1(i), e2(j) { }
};
```

verwendet werden. Welche Meldungen erhält man dann durch die folgenden Definitionen:

```
C c0;
C c1(1);
C c2(1, 2);
```

Welchen Wert würden e1 und e2 bei diesen drei Definitionen erhalten, wenn ihr Datentyp keine Klasse, sondern *int* wäre?

2. Überarbeiten Sie die Klassen *Kreis*, *Quadrat*, *Rechteck* und *C2DPunkt* von Aufgabe 8.1.5, 3. so, dass die Konstrukturen alle Elemente mit Elementinitialisierern initialisieren.

3. Überarbeiten Sie eine Kopie der *Kreis* aus Aufgabe 8.1.5, 3. zu einer Klasse *C2DKreis*. Sie soll als zusätzliches Element einen *C2DPunkt* mit der Position des Kreises (dem Mittelpunkt) enthalten. Definieren Sie für diese Klasse Konstruktoren, so dass Objekte wie in

```
C2DKreis k1(1, 2, 3); // r=1, Mittelpunkt=(2,3)
C2DKreis k2(4); // r=4, Mittelpunkt=(0,0)
C2DKreis k3; // r=1, Mittelpunkt=(0,0)
C2DPunkt p(6, 7);
C2DKreis k4(5, p); // r=5, Mittelpunkt=(6,7)
```

angelegt werden können. Falls nur ein Argument für den Radius übergeben wird, soll die Position der Nullpunkt sein. Ein Standardkonstruktor soll den Radius 1 setzen. Verwenden Sie für möglichst viele Elemente Elementinitialisierer. Versuchen Sie, die Anzahl der Konstruktoren möglichst gering zu halten.

4. Im Konstruktor der Klasse *Rechteck1* soll der Mittelpunkt des Rechtecks angegeben werden. In der Klasse soll allerdings nicht der Mittelpunkt, sondern der linke obere Eckpunkt gespeichert werden:

```
class Rechteck1 {
    C2DPunkt LinksOben; // Eckpunkt links oben
    double a, b; // Seitenlängen
public:
    Rechteck1(C2DPunkt Mittelpunkt, double a_, double b_) :
        a(a_), b(b_), LinksOben(Mittelpunkt.X() - a / 2,
            Mittelpunkt.Y() - b / 2) { }
    string toStr()
    {
        return "Links oben: " + LinksOben.toStr();
    }
};
```

Mit dieser Definition erhält der Punkt *LinksOben* jedoch nicht den beabsichtigten Wert. Finden Sie die Ursache dieses Fehlers und korrigieren Sie die Definition so, dass ein Objekt dieser Klasse das gewünschte Ergebnis hat.

5. In Abschnitt 8.2.1 wurde als Ergänzung zu den Konstruktoren aus Abschnitt 8.1.5 der folgende Standardkonstruktor für die Klasse *MeinString* definiert:

```
class MeinString {
    char* s;
    int n; // Länge des Strings
public:
    MeinString()
    {
        n = 0;
        s = new char[n + 1];
        *s = '\0';
    }
};
```



Da hier nur Platz für ein einziges Zeichen '\0' reserviert wird, hätte man ebenso gut den folgenden Standardkonstruktor verwenden können:

```
class MeinString {
    // ...
    MeinString() :n(0)
    {
        s = new char('\0');
    };
};
```

Vergleichen Sie diese beiden Konstruktoren. Ist einer besser als der andere?

### 8.2.3 *friend*-Funktionen und –Klassen

In Abschnitt 8.1.3 wurde empfohlen, alle Datenelemente einer Klasse *private* zu deklarieren. Dann kann man diese Elemente mit den bisher vorgestellten Sprachelementen nur in einer Elementfunktion der Klasse ansprechen. Wie das nächste Beispiel zeigt, ist die Zugriffsbeschränkung auf Elementfunktionen aber manchmal zu streng.

Beispiel: Angenommen, die Klasse

```
class C2DPunkt {
    double x, y;
public:
    C2DPunkt(double x_, double y_) : x(x_), y(y_) {};
};
```

hätte keine Funktionen zum Setzen der Koordinaten, und Sie hätten die Aufgabe, für die Klasse

```
class C2DKreis {
    C2DPunkt position; // Position des Kreises
    double r;          // Radius
public:
    C2DKreis(C2DPunkt p, double r_) :position(p), r(r_) {}
};
```

eine globale Funktion zu schreiben, die den Kreis an eine bestimmte Position setzt. Dann ist die naheliegende Lösung

```
void setToPosition(C2DKreis& k, const C2DPunkt& p)
{
    k.position.x = p.x; // Fehler: Zugriff auf
    k.position.y = p.y; // 'C2DKreis::position'
                        // nicht möglich
}
```

nicht möglich, weil auf die *private* Elemente von k und p nicht zugegriffen werden kann. Da hier auf die Elemente von zwei verschiedenen Klassen zugegriffen wird, lässt sich dieses Problem nicht dadurch lösen, dass man diese Funktion als

Elementfunktion einer der beiden Klassen definiert. Es erscheint aber auch nicht als angemessen, die Datenelemente nur wegen dieser einen Funktion *public* zu definieren.

Solche Probleme können mit einer **friend-Funktion** gelöst werden. Eine *friend*-Funktion einer Klasse ist eine Funktion, die kein Element der Klasse ist und die trotzdem auf *private* und *protected* Elemente der Klasse zugreifen kann. Sie wird mit dem Schlüsselwort *friend*

- entweder in der Klasse deklariert, auf deren Elemente sie zugreifen können soll, und außerhalb der Klasse definiert:

```
class C {
    int i;
    friend void f(C& x);
};

void f(C& x) // nicht: void C::f(C& x)
{
    x.i = 0; // bei nicht-friend nicht möglich, da i private
}
```

- oder innerhalb der Klasse definiert:

```
class C {
    int i;
    friend void f(C& x) // das ist keine Elementfunktion
    {                // f kann wie eine außerhalb der Klasse
        x.i = 0;      // definierte Funktion aufgerufen werden
    }
};
```

Eine solche Definition innerhalb der Klasse ist vor allem für Operatorfunktionen intuitiv.

Dabei spielt es keine Rolle, ob sie in einem *private*, *public* oder *protected* Abschnitt der Klasse aufgeführt wird. Sie hat keinen *this*-Zeiger und wird wie eine gewöhnliche Funktion aufgerufen, d.h. ohne den Punkt- oder Pfeiloperator mit einem Objekt:

```
void call_f() // das geht auch für eine innerhalb der
{            // Klasse definierte friend-Funktion
    C c;
    f(c); // nicht: c.f(c)
}
```

Eine Funktion wird dadurch zum *friend* einer Klasse, dass man eine *friend*-Deklaration in die Klasse aufnimmt. Man sagt deshalb auch, dass sich eine Klasse ihre Freunde auswählt, und nicht etwa die Freunde die Klasse wählen. Und das Zugriffsrecht auf *private* Elemente wird auch durch die Formulierung beschrieben, dass Freunde einer Klasse in die Taschen greifen dürfen.

Auch eine Elementfunktion einer Klasse kann ein *friend* einer Klasse sein:

```

class C {
    void g(C& c);
};

class D {
    friend void C::g(C& x);
};

```

Wenn alle Elementfunktionen einer Klasse *C* *friend* einer Klasse *D* sein sollen, deklariert man die **Klasse C als *friend*** der Klasse *D*:

```

class D {
    double d;
    friend C;
};

C::g(C& c)
{
    D x;
    x.d = 1;
}

```

Ein *friend* einer Klasse *C* ist auch ein *friend* einer verschachtelten Klasse von *C*.

Damit lässt sich das Problem mit der Funktion *setToPosition* dadurch lösen, dass man sie als *friend* der beiden Klassen *C2DPunkt* und *C2DKreis* deklariert:

```

class C2DPunkt {
    double x, y;
    friend void setToPosition(C2DKreis&k, const C2DPunkt&p);
    // ...
};

class C2DKreis {
    C2DPunkt position; // Position des Kreises
    friend void setToPosition(C2DKreis&k, const C2DPunkt&p);
    // ...
};

```

Hätte man *setToPosition* folgendermaßen realisiert, würde es ausreichen, diese Funktion nur als *friend* der Klasse *C2DKreis* zu definieren:

```

void setToPosition(C2DKreis& k, const C2DPunkt& p)
{
    k.position = p;
}

```

Da hier nur auf ein Element der Klasse *C2DKreis* zugegriffen wird, kann man diese Funktion auch durch eine Elementfunktion dieser Klasse realisieren:

```

class C2DKreis {
    C2DPunkt position;
    double r; // Radius
public:
    void setToPosition(const C2DPunkt& p)
    {
        position = p;
    }
};

```

Wie dieses Beispiel zeigt, kann man eine Aufgabe manchmal sowohl mit einer *friend*-Funktion als auch mit einer Elementfunktion lösen. Da Elementfunktionen aber unter anderem den Vorteil haben,

- dass sie den Gültigkeitsbereich von Klassenelementen nicht auf Funktionen erweitern, die nicht zur Klasse gehören, und
- viel offensichtlicher zur Klasse gehören und deshalb bei einer Änderung der Klasse eventuell ebenfalls geändert werden müssen,

sollte man eine **Elementfunktion bevorzugen**.

Diese Alternative besteht oft auch dann, wenn man zunächst nur eine *friend*-Funktion als Lösung gefunden hat. Dann sollte man immer gezielt nach einer Lösung mit einer Elementfunktion suchen. Eine solche Funktion kann man oft finden.

Beispiel: Eine Funktion wie *setToPosition* gehört für eine Klasse wie *C2DKreis* normalerweise zu einer vollständigen Schnittstelle, und man kann es als Designfehler betrachten, wenn eine solche Funktion vergessen wird.

Viele umfangreiche C++-Bibliotheken (wie z.B. die Standardbibliothek) kommen mit relativ wenigen *friend*-Funktionen aus.

Es gibt allerdings auch Situationen, in denen man eine globale Funktion benötigt, die auf die Elemente einer Klasse zugreifen kann und die deshalb ein *friend* der Klasse sein muss. Beispiele dafür sind einige der im nächsten Abschnitt vorgestellten binären Operatorfunktionen.

## 8.2.4 Überladene Operatoren mit Elementfunktionen

Nachdem in Abschnitt 7.3 gezeigt wurde, wie man eine **Operatorfunktion** als **globale Funktion** definiert, werden jetzt Operatorfunktionen vorgestellt, die als **Elementfunktion** definiert sind.

Zur Erinnerung: Mit dem Symbol @ für einen binären Operator wird eine **globale Operatorfunktion** folgendermaßen definiert (T, C1 und C2 sind die Datentypen des Funktionswertes und der Operanden):

$$T \text{ operator@}(C1 \text{ p1}, C2 \text{ p2})$$

Diese Funktion wird dann durch den Ausdruck

`x@y`

aufgerufen. Der Compiler übergibt den linken Operanden als erstes und den rechten als zweites Argument:

`operator@(x,y)`

Der Funktionswert ist der Wert des Ausdrucks. Dabei müssen die Datentypen von `x` und `y` nicht identisch mit `C1` und `C2` sein: Es reicht aus, wenn sie in die Datentypen der Parameter konvertiert werden können und zu einem eindeutigen Funktionsaufruf führen.

Eine globale Operatorfunktion muss meist auf *private* oder *protected* Elemente der Operanden zugreifen. Deswegen müssen globale Operatorfunktionen meist ein *friend* der Klassen `C1` und `C2` sein.

Für alle überladbaren Operatoren kann die Operatorfunktion auch als **Elementfunktion** definiert werden. Eine Elementfunktion der Klasse `C1` für einen **binären Operator** `@` hat nur einen Parameter, für den dann beim Aufruf der zweite Operand eingesetzt wird. Für den ersten Operanden wird das aktuelle Objekt eingesetzt. Deswegen wird eine solche Operator-Elementfunktion nur aufgerufen, wenn der Datentyp des linken Operanden die Klasse ist.

Die Operatorfunktion

`T C1::operator@(C2 p2)`

wird für einen linken Operanden `x` den Datentyps `C1` durch den Ausdruck

`x@y`

aufgerufen. Der rechte Operand `y` wird als Argument für `p2` übergeben:

`x.operator@(y)`

Entsprechend wird ein **unärer Operator** `@` durch eine Elementfunktion ohne Parameter überladen. Für ein Objekt `x` einer Klasse `C` führt dann der Ausdruck

`@x`

zum Aufruf der Funktion

`x.operator@()`

Die Präfix- und Postfix-Versionen der Operatoren `++` und `--` werden wie bei globalen Funktionen durch einen zusätzlichen *int*-Parameter unterschieden:

```
T& operator++();    // präfix Elementfunktion
T& operator--();    // präfix Elementfunktion
T operator++(int);  // postfix Elementfunktion
T operator--(int);  // postfix Elementfunktion
```

Im C++-Standard ist festgelegt, dass die Operatoren = (Zuweisung), () (Funktionsaufruf), [] (Indexoperator) und -> (Zugriff auf ein Klassenelement) nicht mit globalen Funktionen überladen werden können, sondern **nur mit Elementfunktionen**. Alle anderen Operatoren können sowohl mit globalen Funktionen als auch mit Elementfunktionen als auch mit beiden Formen überladen werden.

$x@y$  führt zum Aufruf der Operator-Elementfunktion, wenn der Datentyp des linken Operanden  $x$  eine solche Elementfunktion hat. Falls  $x$  keine solche Operator-Elementfunktion hat, wird eine globale Operatorfunktion aufgerufen, falls sie existiert. Dann muss der Datentyp von  $x$  nicht einmal identisch mit dem Datentyp des ersten Parameters sein: Wie bei jedem anderen Funktionsaufruf reicht es aus, wenn er in den Datentyp des Parameters konvertiert werden kann.

Beispiel: Für die Klasse *MeinString* kann der Operator  $<$  durch die globale Funktion

```
bool operator<(const MeinString& s, const MeinString& t)
{ // muss friend von MeinString sein
  return (strcmp(s.s, t.s) < 0);
} // sehr einfach: funktioniert nicht mit Umlauten
```

definiert werden. Eine entsprechende Elementfunktion ist:

```
class MeinString {
  char* s;
  int n; // Länge des Strings
public:
  bool operator<(const MeinString& t)
  {
    return (strcmp(s, t.s) < 0);
  }
};
```

Falls beide Funktionen definiert sind, wird nach der Definition

```
MeinString s1, s2;
```

bei den folgenden Ausdrücken die als Kommentar angegebene Funktion aufgerufen:

```
s1 < s2      // s1.operator<(s2)
s1 < "123"   // s1.operator<(MeinString("123"))
"123" < s1   // operator<(MeinString("123"),s1)
```

Zwischen globalen Operatorfunktionen und Elementfunktionen besteht also insbesondere der **Unterschied**, dass die globale Operatorfunktion nicht nur mit einem ersten Operanden eines einzigen Datentyps aufgerufen werden kann.

Beispiel: Für zwei Strings  $s1$  und  $s2$  der Klasse *MeinString* sind mit einer Elementfunktion für den Operator  $+$  nur die ersten drei der folgenden Operationen möglich.

```

s1 + s2;
s1 + "char*";
s1 + 'c';
"char*" + s2;
'c' + s2;

```

Da bei den letzten beiden der Datentyp des linken Operanden nicht die Stringklasse ist, sind diese nur mit einer globalen Operatorfunktion möglich. Diese Operatorfunktion kann global folgendermaßen implementiert werden:

```

MeinString operator+(const MeinString& s, const MeinString&
t)
{ // Muss ein friend von MeinString sein
  MeinString tmp;
  tmp.n = s.Laenge() + t.Laenge();
  tmp.s = new char[tmp.n + 1];
  strcpy(tmp.s, s.s);
  strcat(tmp.s, t.s);
  return tmp; // tmp erfüllt die Klasseninvariante
}             // (siehe Abschnitt 8.1.7)

```

Für die Ausdrücke von oben sind die folgenden Konstruktoren notwendig:

```

class MeinString {
public:
  MeinString(char* p);
  MeinString(char c);
};

```

Als weiteres Beispiel für eine als Elementfunktion definierte Operatorfunktion wird jetzt der **Indexoperator** [] für die Klasse *MeinString* vorgestellt. Dieser Operator ist ein binärer Operator, der nur als nicht statische Elementfunktion einer Klasse und nicht durch eine globale Funktion überladen werden kann:

```

class MeinString {
  char* s;
  int n; // Länge des Strings
public:

  char& operator[](int i)
  { // Vorbedingung: 0<=i<n
    return *(s + i);
  }; // Die Klasseninvariante (siehe Abschnitt 8.1.7)
}; // ist erfüllt.

```

Nach dieser Definition ist der Aufruf der Operatorfunktion

```
s.operator[](i) // z.B. nach MeinString s("123"); int i;
```

gleichwertig mit dem indizierten Ausdruck:

```
s[i]
```

Da der Rückgabotyp der Operatorfunktion ein Referenztyp ist, kann man einen solchen Ausdruck auch auf der linken Seite einer Zuweisung verwenden:

```
s[1] = 'A';
```

Diese Operatorfunktion kann man leicht so erweitern, dass der Zugriff auf einen unzulässigen Index erkannt wird und z.B. eine Exception auslöst:

```
char& operator[](int i)
{
    if (i < 0 || i >= n) throw std::out_of_range("String-Index");
    return *(s + i);
};
```

Der Parameter des Indexoperators kann einen **beliebigen Datentyp** haben und muss nicht wie bei einem Array ein Ganzzahldatentyp sein. Auf diese Weise kann man Klassen realisieren, die sich wie assoziative Container verhalten. Der gesuchte Wert wird dabei als Argument übergeben, und der gefundene Wert ist der Funktionswert der Operatorfunktion.

#### Aufgaben 8.2.4

1. Die Operatorfunktionen für die Ein- und Ausgabeoperatoren << bzw. >> einer selbstdefinierten Klasse C können prinzipiell sowohl als Elementfunktionen der Klasse C als auch als globale Funktionen definiert werden. Vergleichen Sie die beiden Alternativen im Hinblick auf die Syntax beim Aufruf.
2. Überarbeiten Sie eine Kopie der Klasse *Bruch* von Aufgabe 7.3.1, 2. so, dass die Datenelemente *private* sind. Ergänzen Sie diese Klasse um einen geeigneten Konstruktor. Definieren Sie
  - a) die Funktion für den Operator – als *friend*-Funktion.
  - b) die Operatorfunktion += als Elementfunktion und verwenden Sie diese zur Definition des +-Operators, so dass Sie keine *friend*-Funktion benötigen.

#### 8.2.5 Der dreifache Vergleichsoperator <=> (Spaceship Operator)

In C++20 wurde die Möglichkeit aufgenommen, mit dem sogenannten dreifachen Vergleichsoperator <=> (auch three way comparison oder auch spaceship-Operator genannt) alle 4 Operatoren <, <=, > und >= durch eine einzige Funktion zur Verfügung zu stellen und diese in einfachen Fällen sogar vom Compiler erzeugen zu lassen. Außerdem wird != auf == zurückgeführt. Diese Möglichkeit steht seit Visual Studio 2019 nach

```
#include <compare>
```



zur Verfügung. Im C++20-Standard wurden dann für alle Containerklassen usw. die jeweils 6 Operatorfunktionen `<`, `<=` usw. durch die beiden Operatorfunktionen `operator<=>` und `operator==` ersetzt.

Definiert man die beiden Operatorfunktionen `operator==` und `operator<=>` (im einfachsten Fall mit „`default`“ in der default-Variante)

```
using namespace std;

struct AbCpp20 {
    int x;
    constexpr AbCpp20(int w) : x{w}{} // das geht auch ohne constexpr
    bool operator==(const AbCpp20& y) const { return y == x; }
    auto operator<=>(const AbCpp20&) const = default;
}; // hier ist operator== nicht einmal notwendig, weil der schon für
    int vordefiniert ist
```

stehen alle 6 Operatoren `<`, `<=`, `>`, `>=`, `==` und `!=`. für diesen Datentyp zur Verfügung:

```
AbCpp20 x(1), y(2);
bool kleiner = x < y;
bool kleiner_gleich = x <= y;
bool groesser = x > y;
bool groesser_gleich = x >= y;
bool gleich = (x == y);
bool ungleich = x != y;
```

Vor C++20 hätte man noch für jeden einzelnen Operator eine eigene Operatorfunktion schreiben müssen:

```
struct VorCpp20 // wie EinWert
{
    int x;
    friend bool operator==(VorCpp20 a, VorCpp20 b) { return a.x==b.x; }
    friend bool operator< (VorCpp20 a, VorCpp20 b) { return a.x<b.x; }
    friend bool operator!=(VorCpp20 a, VorCpp20 b) { return !(a==b); }
    friend bool operator<=(VorCpp20 a, VorCpp20 b) { return !(b < a); }
    friend bool operator> (VorCpp20 a, VorCpp20 b) { return b < a; }
    friend bool operator>=(VorCpp20 a, VorCpp20 b) { return !(a < b); }
};
```

Mit dem durch `=default` erzeugten `operator<=>` erzeugt Compiler Vergleiche, bei denen sich das Ergebnis eines Vergleichs von zwei Variablen aus dem lexikografischen Vergleich der Datenelemente (in der Reihenfolge, in der sie in der Klassendefinition angegeben sind) ergibt.

Beispiel: Da durch `operator<=>` insbesondere der `<`-Operator verfügbar ist, kann man einen Container sortieren. Für Variablen mit zwei `int`-Werten wie in

```
struct Paar { // das geht auch ohne constexpr
    int x, y;
    constexpr Paar(int w1, int w2) : x{ w1 }, y{ w2 }{ }
    auto operator<=>(const Paar&) const = default;
};
```

erhält man die als Kommentar angegebene Reihenfolge:

```
vector<Paar> v2 = { {2,1},{1,2},{2,2} };
std::sort(v2.begin(), v2.end()); // v2 = {{1,2} {2,1}, {2,2}}
```

Vertauscht man die Reihenfolge von x und y in *Paar*, erhält man die umgekehrte Sortierfolge.

Der Compiler erzeugt für eine Klasse wie *AbCpp20* nur die beiden in der Klassendefinition angegebenen Operatorfunktion. Die Aufrufe der anderen Operatoren werden dann so in den Aufruf dieser Operatorfunktionen übersetzt, wie es der üblichen Logik entspricht:

- Der Aufruf des `!=` Operators führt zu einer Negation des Aufrufs des `==` Operators:

```
bool ungleich = x != y; // !x.operator==(y); bzw. !operator==(x,y);
```

- Der Aufruf einer der Operatoren `<`, `<=`, `>`, `>=` führt zu einem Aufruf wie im Kommentar:

```
bool kleiner = x < y, // kleiner = x.operator<=>(y) < 0;
kleiner_gleich = x <= y, // kleiner_gleich = x.operator<=>(y) <= 0;
groesser = x > y, // groesser = x.operator<=>(y) > 0;
groesser_gleich = x >= y; // groesser_gleich = x.operator<=>(y) >= 0;
```

Die Operatorfunktion `<=>` muss deshalb im Prinzip für `x<y` einen beliebigen Wert `<0`, für `x>y` einen beliebigen Wert `>0` und für `x==y` den Wert `0` zurückgeben. Tatsächlich gibt sie aber keine *int*-Werte zurück, sondern einen der Werte *less*, *equal* oder *greater* usw. aus einer der Klassen

```
class strong_ordering {
public:
    static const strong_ordering less;
    static const strong_ordering equal;
    static const strong_ordering equivalent;
    static const strong_ordering greater;
```

Die Klasse *weak\_ordering* enthält ebenfalls die Elemente *less*, *equal* und *greater* sowie *equivalent* des Typs *partial\_ordering*

```
class weak_ordering {
public:
    static const weak_ordering less; // analog greater und equal
    static const weak_ordering equivalent;
```

Die Klasse *partial\_ordering* enthält ebenfalls die Elemente *less*, *equal* und *greater* sowie *unordered* des Typs *partial\_ordering*

```
class partial_ordering {
public:
    static const partial_ordering less; // analog greater und equal
    static const partial_ordering unordered;
```

**Meist** gibt man die Werte aus *strong\_ordering* zurück. Diese Werte sind bei einer Totalordnung angemessen. Das heißt, dass

- 1. alle Vergleichsoperatoren <, <=, >, >=, == und != einen Sinn haben, und dass
- 2. von den drei Vergleichen  $a < b$ ,  $a == b$ , und  $a > b$  genau einer *true* ergibt, und dass
- 3. der Wert *strong\_ordering::equal*, bedeutet, dass für Variablen  $x$  und  $y$  mit  $x==y$  und für Funktionen, die nur den Wert des Arguments verwenden, auch  $f(x) == f(y)$  gilt.

Werte aus einer *weak\_ordering* verwendet man, wenn 1. und 2. gilt, aber Gleichheit nur eine Äquivalenzklasse definiert (z.B. beim Vergleich von Strings unabhängig von der Groß- und Kleinschreibung).

Werte einer *partial\_ordering* verwendet man, wenn es Elemente gibt, für die keiner der Werte von *strong\_ordering* gilt (z.B. bei Personen mit der Ordnung „ $x$  stammt ab von  $y$ “)

Die nächsten Beispiele sollen verschiedene Alternativen für den *operator<=>* für eine Klasse für ein Kalenderdatum zeigen. Das erste Beispiel zeigt das universelle Schema für einen mehrstufigen Vergleich:

```
struct Datum // struct statt class nur, damit
{           // dieses Beispiel etwas kürzer wird
    int Tag, Monat, Jahr;
    bool operator==(const Datum& rhs) const
    { // Dieser Operator ist nicht notwendig, wenn nur sortiert wird
        return Tag==rhs.Tag && Monat == rhs.Monat && Jahr == rhs.Jahr;
    };
    auto operator<=>(const Datum& rhs) // const = default;
    {
        if (Jahr != rhs.Jahr)
        {
            if (Jahr < rhs.Jahr)
                return std::strong_ordering::less;
            else
                return std::strong_ordering::greater;
        }
        else if (Monat != rhs.Monat)
        {
            if (Monat < rhs.Monat)
                return std::strong_ordering::less;
            else
                return std::strong_ordering::greater;
        }
    }
}
```

```

    else
    {
        if (Tag < rhs.Tag)
            return std::strong_ordering::less;
        else if (Tag > rhs.Tag)
            return std::strong_ordering::greater;
        else
            return std::strong_ordering::equal;
    }
}
};

```

Damit erhält man

```

std::array<Datum, 3> d1 = { Datum{10,11,2020}, Datum{9,12,2019},
                          Datum{9,11,2020} };
std::sort(d1.begin(),d1.end()); // {{9,12,2019}{9,11,2020}
                                {10,11,2020}}

```

Falls `operator<=>` für einen Elementtyp aber schon definiert ist (wie z.B. für elementare Datentypen wie `int`), kann man diesen verwenden und erhält eine wesentlich kürzere Version:

```

struct Datum
{
    int Tag, Monat, Jahr;
    std::strong_ordering operator <=> (const Datum& rhs) const
    {
        if (auto cmp = Jahr <=> rhs.Jahr; cmp != 0) return cmp;
        if (auto cmp = Monat <=> rhs.Monat; cmp != 0) return cmp;
        return Tag <=> rhs.Tag;
    }
};

```

Mit der default-Version wird es noch einfacher. Dabei muss man aber beachten, dass die Reihenfolge der Elemente entscheidend für die Anordnung ist. Ändert man diese, ändert sich auch die Sortierfolge.

```

struct Datum
{
    int Jahr, Monat, Tag; // Reihenfolge wichtig!
    auto operator <=> (const Datum& rhs) const = default;
};

std::array<Datum, 3> d3 = { Datum{2020,11,10}, Datum{2019,12,9},
                          Datum{2020,11,9} };
std::sort(d3.begin(),d3.end()); // {{2019,12,9} {2020,11,9}
                                {2020,11,10}}

```

### 8.2.6 Der Kopierkonstruktor

Ein Objekt kann bei seiner Definition mit einem anderen Objekt derselben oder einer abgeleiteten Klasse (siehe Abschnitt 8.3.4) initialisiert werden:

```
class C { /* ...*/ };
C c;      // definiere c für die nächste Anweisung

C d = c;  // keine Zuweisung: Initialisierung, da Definition
```

Eine solche **Initialisierung** mit dem Zuweisungsoperator führt ebenso wie jede der beiden Schreibweisen

```
C d(c);    // gleichwertig mit C d=c;
C d{ c };  // gleichwertig mit C d=c;
```

zum Aufruf des sogenannten Kopierkonstruktors. Alle drei Schreibweisen sind gleichwertig. Obwohl eine Initialisierung syntaktisch und inhaltlich eine gewisse Ähnlichkeit mit einer Zuweisung

```
d = c;
```

hat, ist sie eine andere Operation als eine Zuweisung. Bei einer Zuweisung wird der Zuweisungsoperator (siehe dazu den nächsten Abschnitt) und nicht der Kopierkonstruktor der Klasse aufgerufen.

Da eine solche Initialisierung immer mit einer Definition verbunden ist, müssen die dabei definierten Datenelemente initialisiert werden wie bei jedem anderen Konstruktor auch. Bei einer Zuweisung werden dagegen die bisherigen Werte der linken Seite ungültig. Falls das Objekt auf der linken Seite Zeiger enthält, müssen die Speicherbereiche freigegeben werden, auf die sie zeigen. Diesen unterschiedlichen Anforderungen kann man in einem Zuweisungsoperator und in einem Kopierkonstruktor nachkommen.

Ein **Kopierkonstruktor** einer Klasse C ist dadurch charakterisiert, dass sein erster Parameter den Datentyp *C&*, *const C&*, *volatile C&* oder *const volatile C&* hat. Weitere Parameter können vorhanden sein. Sie müssen aber alle Default-Argumente haben.

Beispiele:

1. Alle Constructoren der Klasse C außer dem ersten sind Kopierconstructoren:

```
class C {
public:
    C() { };
    C(C& c) { };
    C(C& c, int i = 0) { };
    C(const C& c) { };
};
```

Mit

```
const C c;
```

führt dann die Initialisierung

```
C d = c;
```

zum Aufruf des Konstruktors mit dem *const*-Parameter. Dabei wird die rechte Seite als erstes Argument übergeben. Hätte man das Objekt *c* ohne *const* definiert, könnte der Compiler nicht entscheiden, ob er den zweiten oder den dritten Konstruktor von *C* aufrufen soll.

- Der erste Konstruktor von *D* ist kein Kopierkonstruktor. Der zweite Konstruktor mit dem Wertparameter ist nicht zulässig, da sein Aufruf zu einer endlosen Rekursion führen würde:

```
class D {
public:
    D(D& c, int i);
    D(D c); // error: unzulässiger Kopierkonstruktor:
};         // erster Parameter darf nicht 'D' sein
```

Bei den meisten Klassen reicht ein einziger Kopierkonstruktor der Form

```
C::C(const C&);
```

aus. Objekte dieser Klassen kann man dann sowohl mit konstanten als auch mit nicht konstanten Ausdrücken initialisieren. Außerdem ist dann sichergestellt, dass der initialisierende Ausdruck nicht verändert wird. Wenn eine Klasse dagegen nur den Konstruktor

```
C::C(C&);
```

besitzt, kann ein Objekt dieser Klasse nicht mit konstanten Ausdrücken initialisiert werden.

Wenn man für eine Klasse **explizit keinen** Kopierkonstruktor definiert, erzeugt der Compiler einen, wenn er verwendet wird. Dieser **implizit** erzeugte Kopierkonstruktor bewirkt, dass bei einer Initialisierung alle nicht statischen Datenelemente mit den entsprechenden Werten der Elemente des initialisierenden Ausdrucks initialisiert werden.

Beispiel: Die Klasse *C* soll zwei nicht statische Datenelemente des Typs *C1* und *C2* haben:

```
struct C {
    C1 c1;
    C2 c2;
};
```

Dann erzeugt der Compiler für diese Klasse einen Kopierkonstruktor, der alle Elemente wie in dem folgenden Kopierkonstruktor initialisiert:

```
C(const C& x) : c1(x.c1), c2(x.c2) { }
```

Falls das Element eine Klasse ist, wird zur Initialisierung der Kopierkonstruktor des Elements ausgerufen. Bei einem Array werden alle Elemente einzeln initialisiert. Ein Element eines skalaren Datentyps wird mit dem vordefinierten Zuweisungsoperator initialisiert.

Beispiel: Auch wenn man für die Klasse *C2DPunkt* keinen Kopierkonstruktor definiert, ist nach der Definition

```
C2DPunkt p1(2, 3);
```

die folgende Initialisierung möglich:

```
C2DPunkt p2 = p1;
```

Da für diese Initialisierung ein Kopierkonstruktor benötigt wird, erzeugt ihn der Compiler implizit. Dabei werden alle Datenelemente von *p2* mit den entsprechenden Werten von *p1* initialisiert, so dass diese Initialisierung denselben Effekt hat wie

```
p2.x = p1.x;  
p2.y = p1.y;
```

Durch die Angaben *=default* bzw. *=delete* kann man wie beim Standardkonstruktor erreichen, dass ein Kopierkonstruktor erzeugt bzw. nicht erzeugt wird (siehe Abschnitt 8.2.8).

Bei einer Klasse, die **keine Zeiger** enthält, ist der vom Compiler **implizit erzeugte Kopierkonstruktor ausreichend**, wenn jedes Element eines Klassentyps durch seinen Kopierkonstruktor richtig initialisiert wird. Wenn eine Klasse jedoch Zeiger enthält, zeigen sie in beiden Objekten auf denselben Speicherbereich.

Beispiel: Falls für die Klasse *MeinString* wie bisher kein Kopierkonstruktor definiert ist, wird bei der Initialisierung von *t* mit *s* der implizit definierte Kopierkonstruktor aufgerufen:

```
MeinString s("123");  
MeinString t = s;
```

Diese Initialisierung bewirkt, dass die Zeiger *t.s* und *s.s* beide auf denselben Speicherbereich zeigen.

Eine solche Kopie wird auch als „**flache Kopie**“ bezeichnet. Sie hat die folgenden, meist unerwünschten Konsequenzen:

- Jede Veränderung von *s* bewirkt auch eine Veränderung von *t* (und umgekehrt).
- Wenn der Speicherbereich für eines der beiden Objekte freigegeben wird, zeigt das andere auf einen nicht reservierten Speicherbereich.
- Nach dieser Zuweisung besteht keine Möglichkeit mehr, den Speicherbereich freizugeben, auf den *t* vor der Zuweisung gezeigt hat.

Entsprechende Ergebnisse des vom Compiler erzeugten Kopierkonstruktors erhält man bei allen Klassen, die Zeiger enthalten. Diese lassen sich am einfachsten dadurch vermeiden, dass man anstelle von einem Zeiger einen smart pointer (z.B. einen `shared_ptr`) verwendet. Falls das nicht möglich ist, muss man einen Kopierkonstruktor explizit definieren. Deshalb benötigt eine Klasse meist dann einen **explizit definierten Kopierkonstruktor, wenn sie Zeiger enthält**.

Betrachten wir als Beispiel wieder die Klasse *MeinString*. Da der Kopierkonstruktor bei einer Definition (aber nicht bei einer Zuweisung) aufgerufen wird,

```
C x = y; // ruft den Kopierkonstruktor der Klasse C auf
x = y;   // ruft den Zuweisungsoperator auf
```

muss er Speicherplatz für das neue Objekt reservieren und diesen mit den Daten der rechten Seite füllen:

```
class MeinString {
    char* s;
    int n; // Länge des Strings
public:
    // ...
    MeinString(const MeinString& x)
    {
        n = x.n;           // 1
        s = new char[n + 1]; // 2
        strcpy(s, x.s);     // 3
    }; // dieser Konstruktor stellt die Klasseninvariante
};   // (siehe Abschnitt 8.1.7) her
```

Auf die Kommentare kommen wir beim überladenen Zuweisungsoperator für diese Klasse zurück.

Da der Compiler nicht darauf hinweist, wenn er einen **Kopierkonstruktor** erzeugt, sollte man **für jede Klasse mit Zeigern** entweder

- einen solchen Konstruktor **definieren**, oder
- durch **=delete** (siehe Abschnitt 8.2.8) unterbinden, dass ein solcher Konstruktor erzeugt wird.

Sonst kann es vorkommen, dass der implizit erzeugte Kopierkonstruktor verwendet wird, ohne dass man es bemerkt, und dessen flache Kopien unerwünschte Folgen haben.

Der Kopierkonstruktor wird nicht nur bei einer Definition mit einer **Initialisierung** wie in

```
C d = c;
```

aufgerufen. Die folgenden Punkte beschreiben weitere Situationen, die zum **Aufruf** eines **Kopierkonstruktors** führen können. In den Beispielen soll C eine Klasse mit einem *int*-Konstruktor sein:



1. Bei einem Funktionsaufruf mit einem **Wertparameter** wird die lokale Variable durch den Kopierkonstruktor mit dem Argument initialisiert:

```
void f1(C c)
{ // das lokale Objekt c wird beim Aufruf der Funktion
  // f1 mit dem Argument a wie in C c=a initialisiert.
}

C c(1); // Aufruf des Konstruktors C::C(int)
f1(c);  // Führt zum Aufruf des Kopierkonstruktors
```

Falls das Argument für den Wertparameter ein **temporäres Objekt** ist, kann dieses durch die oben beschriebene **Optimierung** direkt in dem Speicherbereich konstruiert werden, der zur lokalen Variablen in der Funktion gehört. Dann unterbleibt der Aufruf des Kopierkonstruktors:

```
f1(C(1)); // Kein Aufruf des Kopierkonstruktors mit dem
          // temporären Objekt C(1)
```

Bei einem **Referenzparameter** wird der Kopierkonstruktor nicht aufgerufen. Im Unterschied zu einem Wertparameter wird so der Aufruf des Kopierkonstruktors und des Destruktors gespart. Deswegen sind konstante Referenzparameter meist etwas schneller als Wertparameter.

2. Auch die Rückgabe eines Funktionswerts mit *return* ist eine Initialisierung. Wenn dabei ein **nicht temporäres Objekt** zurückgegeben wird, führt das zum Aufruf des Kopierkonstruktors:

```
C f3()
{
  C c(1);
  return c; // Initialisiert den Funktionswert mit c
};

c(1);
c = f3(); // Aufruf des Kopierkonstruktors bei return
```

### 8.2.7 Der Zuweisungsoperator = für Klassen

Da Zuweisungen und Initialisierungen sowohl in der klassischen Schreibweise

```
C d = c; // Initialisierung, da Definition
d = c;   // Zuweisung, da keine Definition
```

als auch in der C++11-Schreibweise mit geschweiften Klammern

```
C d{ c }; // Initialisierung, da Definition
d = { c }; // Zuweisung, da keine Definition
```

ähnlich aussehen, soll unmittelbar im Anschluss an den Kopierkonstruktor gezeigt werden, wie man den Zuweisungsoperator „`=`“ für Klassen definieren kann. Diese Funktion wird bei einer Zuweisung aufgerufen.

Der Zuweisungsoperator für eine Klasse C wird durch eine Elementfunktion

```
C::operator=
```

definiert, die genau einen Parameter des Typs C, C&, *const* C&, *volatile* C& oder *const volatile* C& hat. Eine Klasse kann mehr als einen Zuweisungsoperator haben. Dieser muss eine nicht statische **Elementfunktion** sein. Es ist nicht möglich, ihn als globale Operatorfunktion zu definieren. Deshalb ist der linke Operand dieses Operators immer das Objekt *\*this*, mit dem der Operator aufgerufen wird.

Wenn man für eine Klasse **explizit keinen** Zuweisungsoperator definiert, erzeugt der Compiler einen, wenn er verwendet wird. Dieser **implizit** erzeugte Zuweisungsoperator hat eine der beiden Formen

```
C& operator=(C& x)
C& operator=(const C& x)
```

und bewirkt, dass allen nicht statischen Datenelementen die Werte der entsprechenden Elemente des Ausdrucks auf der rechten Seite zugewiesen werden. Er gibt über den Rückgabotyp C& das Objekt zurück, an das die Zuweisung erfolgt.

Beispiel: Die Klasse C soll zwei nicht statische Datenelemente des Typs C1 und C2 und keinen Zuweisungsoperator haben:

```
struct C {
    C1 c1;
    C2 c2;
};
```

Dann erzeugt der Compiler für diese Klasse einen Zuweisungsoperator, der alle Elemente wie im folgenden Zuweisungsoperator kopiert:

```
C& operator=(const C& x)
{
    c1 = x.c1;
    c2 = x.c2;
    return *this;
}
```

Falls das Element eine Klasse ist, wird dabei der Zuweisungsoperator des Elements ausgerufen. Bei einem Array werden alle Elemente einzeln zugewiesen. Für ein Element eines skalaren Datentyps wird der vordefinierte Zuweisungsoperator verwendet.

Beispiel: Auch wenn man für die Klasse *C2DPunkt* keinen Zuweisungsoperator definiert, ist nach der Definition

```
C2DPunkt p1, p2;
```

die Zuweisung

```
p1 = p2;
```

möglich. Dabei werden die Werte aller Datenelemente von p2 an p1 zugewiesen, so dass diese Zuweisung denselben Effekt hat wie

```
p1.x = p2.x;  
p1.y = p2.y;
```

Bei einer Klasse, die keine Zeiger enthält, ist der implizit erzeugte Zuweisungsoperator ausreichend, wenn jedes Element eines Klassentyps durch seinen Zuweisungsoperator richtig kopiert wird. Wenn eine Klasse jedoch Zeiger enthält, erhält man mit dem vom Compiler erzeugten Operator eine „**flache Kopie**“. Die damit verbundenen Probleme wurden schon im letzten Abschnitt beschrieben.

Beispiel: Falls für die Klasse *MeinString* wie bisher kein Zuweisungsoperator definiert ist, wird bei der folgenden Zuweisung der implizit definierte Zuweisungsoperator aufgerufen:

```
t = s; // z.B. nach: MeinString s("123"),t("xyz");
```

Diese Zuweisung bewirkt, dass die Zeiger t.s und s.s beide auf denselben Speicherbereich zeigen.

Da der Compiler nicht darauf hinweist, wenn er einen **Zuweisungsoperator** erzeugt, sollte man **für jede Klasse mit Zeigern** entweder

- einen solchen Operator **definieren**, oder
- durch **=delete** (siehe Abschnitt 8.2.8) unterbinden, dass er erzeugt wird.

Sonst kann es vorkommen, dass der implizit erzeugte Operator verwendet wird, ohne dass man es bemerkt, und dessen flache Kopien unerwünschte Folgen haben.

Eine Klasse benötigt einen explizit überladenen Zuweisungsoperator meist dann, wenn sie Zeiger enthält. Dieses Kriterium wurde auch schon für den Destruktor und den Kopierkonstruktor angegeben. Generell kann man sagen: **Wenn eine Klasse eine dieser Funktionen benötigt, benötigt sie meist auch die beiden anderen.** Diese Regel wird auch als **Dreierregel** bezeichnet. Bei Klassen, die keine Zeiger enthalten, kann man sich die Definition aller dieser Funktionen meist sparen, da die vom Compiler erzeugten Funktionen reichen. Das gilt auch dann, wenn man einen Zeiger durch einen smart pointer ersetzt.

Bei einer Codeanalyse mit den C++ Core Guidelines (siehe Abschnitt 2.13) wird auf eine Nichtbeachtung der Dreierregel hingewiesen:

```

class Dreierregel_1 { // warning C26432: Wenn Sie Standardvorgänge
public: // definieren oder löschen, definieren oder löschen Sie
    //                                     alle (c.21).
    Dreierregel_1(const Dreierregel_1& p) { }
};

class Dreierregel_2 { // warning C26432: Wenn ..., definieren oder
public: //                                     löschen Sie alle (c.21).
    ~Dreierregel_2() {}
};

class Dreierregel_3 { // warning C26432: Wenn ..., definieren oder
public: //                                     löschen Sie alle (c.21).
    Dreierregel_3(const Dreierregel_3& p) { }
    ~Dreierregel_3() {}
};

```

Flache Kopien können mit einem Zuweisungsoperator vermieden werden. In dieser Operatorfunktion kann dann der zur linken Seite gehörende Speicherbereich freigegeben und durch eine Kopie der rechten Seite ersetzt werden. Diese Operatorfunktion wird für eine Klasse C normalerweise nach folgendem Schema definiert:

```

C& operator=(const C& x)
{
    if (this == &x) return *this;
    // 1. alten Speicherbereich freigeben
    // 2. neuen Speicherbereich reservieren
    // 3. x in das aktuelle Objekt kopieren
    return *this;
};

```

Der Rückgabe von *\*this* ermöglicht es, einen Zuweisungsausdruck wieder auf der linken Seite einer Zuweisung zu verwenden und so Zuweisungsketten wie bei den eingebauten Datentypen zu bilden:

```
x = y = z // x=(y=z)
```

Da der Zuweisungsoperator rechtsassoziativ ist, wird dieser Ausdruck vom Compiler wie der verschachtelte Funktionsaufruf

```
x.operator=(y.operator=(z))
```

behandelt. Dieser Ausdruck zeigt, dass der Funktionswert des Ausdrucks ( $y=z$ ) das Argument für den äußeren Funktionsaufruf ist. Deshalb liegt es nahe, für den Rückgabetytpe denselben Datentyp wie für das Argument zu wählen, also den Referenztyp C&.

Allerdings sind solche Zuweisungsketten auch mit dem Rückgabetytpe C anstelle von C& möglich. Die Notwendigkeit für den Referenztyp ergibt sich lediglich aus der Klammerregel, nach der durch

```
(x = y) = z;
```

zunächst x den Wert von y erhält, und x anschließend durch den Wert von z überschrieben wird. Dieses Ergebnis erhält man nur mit einem Referenztyp. Mit dem Rückgabotyp C erhält x in dieser Zuweisung nur den Wert von y, aber nicht den von z, da der Funktionswert von (x=y) ein temporäres Objekt ist und diesem z zugewiesen wird.

Da man solche diffizilen Feinheiten leicht übersieht, sollte man den **Zuweisungsoperator immer nach dem Schema von oben definieren**.

Betrachten wir als Beispiel einen Zuweisungsoperator für die Klasse *MeinString*. Dieser kann folgendermaßen definiert werden:

```
class MeinString {
    char* s;
    int n; // Länge des Strings
public:
    // ...
    MeinString& operator=(const MeinString& x)
    {
        if (this != &x)           // a
        {
            delete[] s;           // b
            n = x.n;               // 1
            s = new char[n + 1];   // 2
            strcpy(s, x.s);        // 3
        }
        return *this;             // c
    }; // dieser Operator stellt die Klasseninvariante
}; // (siehe Abschnitt 8.1.7) her
```

In der Zeile b dieser Operatorfunktion wird zunächst der Speicherbereich wieder freigegeben, auf den der Zeiger s bisher gezeigt hat. Die Zeilen 1 bis 3 konstruieren den neuen String aus der rechten Seite der Zuweisung und sind mit den entsprechenden Anweisungen im Kopierkonstruktor identisch. Eine Prüfung wie in Zeile a ist notwendig, damit ein Objekt auch sich selbst zugewiesen werden kann. Ohne eine solche Abfrage würde die Zuweisung

```
s = s;
```

dazu führen, dass der Speicherbereich mit den Zeichen des Strings zuerst (Zeile b) freigegeben und dann in Zeile 3 als Quelle für die Kopie verwendet wird. Das Ergebnis eines Zugriffs auf einen mit *delete* freigegebenen Speicherbereich ist aber undefiniert.

Durch die Angaben *=default* bzw. *=delete* kann man wie beim Standardkonstruktor erreichen, dass ein Zuweisungsoperator erzeugt bzw. nicht erzeugt wird (siehe Abschnitt 8.2.8).

Abschließend soll nochmals auf den **Unterschied** zwischen dem **Zuweisungsoperator** und dem **Kopierkonstruktor** hingewiesen werden: Der Kopierkonstruktor wird nur bei einer Initialisierung aufgerufen und nicht bei einer Zuweisung. Der Zuweisungsoperator wird dagegen nur bei einer Zuweisung aufgerufen:

```

C x = y; // ruft den Kopierkonstruktor der Klasse C auf
x = y;   // ruft den Zuweisungsoperator auf

```

Die beiden Funktionen der Klasse *MeinString* zeigen die typischen Unterschiede:

- Bei der Initialisierung wird der Speicher für ein Objekt nur reserviert, während bei einer Zuweisung der für den linken Operanden reservierte Speicher auch freigegeben werden muss. Deswegen ist die mit // b gekennzeichnete Anweisung im Kopierkonstruktor nicht notwendig.
- Der Kopierkonstruktor kann wie jeder andere Konstruktor keinen Funktionswert zurückgeben. Deswegen hat er keine Anweisung wie in // c.
- Mit dem Kopierkonstruktor sind keine Zuweisungen wie *s=s* möglich. Deshalb ist die mit // a gekennzeichnete Anweisung nicht notwendig.

Im Unterschied zu allen anderen Operatorfunktionen wird ein überladener Zuweisungsoperator nicht an eine abgeleitete Klasse vererbt (siehe Abschnitt 8.3.4).

### Aufgaben 8.2.7

1. Begründen Sie für jede der folgenden Klassen, ob für sie ein Kopierkonstruktor, ein überladener Zuweisungsoperator oder ein Destruktor explizit definiert werden muss. Falls eine solche Funktion notwendig ist, definieren Sie diese.
  - a) Die Klassen *Kreis*, *Quadrat* und *Rechteck* von Aufgabe 8.1.5, 3.
  - b) Ein einfaches Programm zur Verwaltung von Immobilien soll eine Klasse *Grundstueck* enthalten, mit der Grundstücke dargestellt werden können. Diese Klasse soll die Datenelemente *Anschrift* des Datentyps *char\**, *Kaufpreis* des Datentyps *double* und *Flaeche* enthalten.
  - c) Wie wäre ihre Antwort, wenn die Strings in *Grundstueck* von b) nicht mit *char\**, sondern mit der Stringklasse *string* definiert wäre.
  - d) Kann es mit Nachteilen verbunden sein, diese Funktionen zu definieren, obwohl das nicht notwendig ist, weil sie vom Compiler erzeugt werden?
  - e) Oft kann man eine Klasse sowohl mit Zeigern als auch ohne Zeiger definieren, ohne dass eine dieser beiden Varianten Nachteile gegenüber der anderen hat. Vergleichen Sie den Aufwand für die Implementation der beiden Varianten.
2. a) Beschreiben Sie, was beim Aufruf der Funktion *test* passiert:

```

class MeinString {
    char* s; // Zeiger auf nullterminierten String
    int n; // Länge des Strings
public:
    MeinString(const char* p) // 1
    {
        n = strlen(p);
        s = new char[n + 1];
        strcpy(s, p);
    };
    ~MeinString() { delete[] s; }
};

```

```
void test()
{
    MeinString s1("abc"), s2("31234");
    s1 = s2;
}
```

- b) Führen Sie die Funktion *test* aus. Falls dabei ein Fehler auftritt, beheben Sie diesen.
  - c) Falls in b) ein Fehler aufgetreten ist: Gibt es noch eine ähnliche Konstellation, die zu einem Fehler führen kann? Geben Sie Anweisungen an, die zu diesem Fehler führen. Beheben Sie dann die Ursache für diesen Fehler.
3. Im C++-Standard wird verlangt, dass der Zuweisungsoperator eine Elementfunktion der Klasse ist. Angenommen, diese Regel würde nicht gelten. Welche unerwarteten Effekte könnten dann auftreten?

```
class MeineKlasse {
    // Hier soll kein Zuweisungsoperator definiert sein.
    // Deshalb erzeugt ihn der Compiler selbst.
    // ...
};

MeineKlasse a, b;

// Ein selbstdefinierter Zuweisungsoperator:
MeineKlasse& operator=(MeineKlasse& lhs, const MeineKlasse& rhs)
{
    // ...
}
```

### 8.2.8 Die Angaben *=delete* und *=default*

In C++03 erzeugt der Compiler den Standardkonstruktor, den Kopierkonstruktor, den Zuweisungsoperator und den Destruktor einer Klasse automatisch, wenn diese nicht explizit definiert werden. Der Move-Konstruktor und der Move-Operator werden unter etwas komplizierteren Bedingungen automatisch erzeugt. Diese Funktionen werden zusammenfassend auch als spezielle Elementfunktionen bezeichnet.

Die Bedingungen, unter denen diese speziellen Elementfunktionen automatisch erzeugt werden, sind oft richtig. Aber es gibt auch Situationen, in denen andere Regeln besser wären. Deswegen wurde in C++11 die Möglichkeit aufgenommen, für jede spezielle Elementfunktion festlegen zu können, ob diese erzeugt wird oder nicht. Gibt man nach dem Prototyp einer speziellen Elementfunktion

*=default* an, wird diese immer erzeugt  
*=delete* an, wird diese nicht erzeugt

Eine mit *=default* erzeugte spezielle Elementfunktion hat denselben Effekt wie die vom Compiler unter normalen Bedingungen erzeugte Funktion. In älteren Versionen von C++ (vor C++11) hat man den Effekt von *=delete* dadurch erreicht, dass man die entsprechende Funktion in einem *private* oder *protected* Abschnitt definiert hat.

Beispiel: Die Klasse C1 hat einen Standardkonstruktor, obwohl sie auch noch andere Konstruktoren enthält.

```
struct C1 {
    C1(int i) { }
    C1() = default;
};
```

Die Klasse C2 hat keinen Standardkonstruktor, obwohl sie keine Konstruktoren enthält:

```
struct C2 {
    int x;
    C2() = delete;
};
```

Seit C++11 kann man bei Klassen, bei denen ein Zuweisungsoperator oder Kopierkonstruktor keinen Sinn machen, durch die Angabe `=delete` unterbinden, dass diese vom Compiler erzeugt werden. Da diese Angabe in der Klassendefinition enthalten ist, sieht man dieser unmittelbar an, dass man kein Objekt aus einem anderen erzeugen kann:

```
class thread { // #include <thread>
public:
    ...
    thread(const thread&) = delete;
    thread& operator=(const thread&) = delete;
    ...
}
```

Wenn man spezielle Elementfunktionen mit `=default` erzeugt bzw. mit `=delete` löscht, muss man darauf achten, dass die **Dreierregel** (Kopierkonstruktor, Zuweisungsoperator und Destruktor: entweder alle oder keinen) eingehalten wird.

Die Angabe `=delete` ist **nicht nur bei den speziellen Elementfunktionen** möglich, sondern außerdem auch bei anderen Elementfunktionen oder globalen Funktionen.

Beispiele: Durch einen mit `=delete` gekennzeichneten *operator new* kann man verhindern, dass ein Objekt mit *new* angelegt wird:

```
struct C
{
    void* operator new(std::size_t) = delete;
};

void test()
{
    C* pc = new C(); //Fehler: Zugriff auf gelöschte Funktion
}
```



Durch eine in einer abgeleiteten Klasse mit `=delete` gekennzeichnete Funktion kann man verhindern, dass diese Funktion mit einem Objekt der abgeleiteten Klasse aufgerufen wird:

```
struct C
{
    void f() {};
};

struct D:public C
{
    void f() = delete;
};

void test2()
{
    D d;
    d.f(); // Fehler: Zugriff auf gelöschte Funktion
}
```

Durch eine mit `=delete` gekennzeichnete überladene Funktion kann man verhindern, dass diese mit einem speziellen Argumenttyp aufgerufen wird:

```
void f(double x) {}
void f(float x) = delete;

f(3.14); // das geht
f(3.14f); // Fehler: Zugriff auf gelöschte Funktion
```

### 8.2.9 Konvertierende und explizite Konstruktoren $\Theta$

In diesem Abschnitt werden zunächst die konvertierenden und expliziten Konstruktoren von C++03 vorgestellt. Die Erweiterungen für C++11 folgen am Ende.

Wenn eine Klasse `C` einen Konstruktor hat, der mit genau einem Argument eines Datentyps `T` aufgerufen werden kann,

```
class C {
public:
    C(T p) {}
};
```

wird dieser bei einer Initialisierung oder Zuweisung mit einem Ausdruck `t` des Typs `T`

```
C c = t;
c = t;
```

**implizit** vom Compiler aufgerufen. Außerdem wird er bei einer **expliziten Konversion** aufgerufen:

```
C c = (C)t;
c = static_cast<C>(t);
```

Da dieser Konstruktor den Ausdruck des Datentyps T in ein Objekt des Datentyps C konvertiert, bezeichnet man einen solchen Konstruktor als **konvertierenden Konstruktor**. Ein konvertierender Konstruktor wird insbesondere auch für ein Argument aufgerufen, wenn eine Funktion mit einem Parameter des Typs C

```
void f(C x) {}
```

mit einem Argument t des Typs T aufgerufen wird:

```
f(t);
```

Dieser Aufruf wird dann zum Aufruf

```
f(C(t));
```

Da man beim Aufruf f(t) leicht übersieht, dass dieser zum Aufruf von f(C(t)) führt, kann ein konvertierender Konstruktor zu Ergebnissen führen, die nicht beabsichtigt sind.

Beispiel: Wenn eine Klasse einen Konstruktor mit einem *int*-Parameter hat,

```
class MeinString {
public:
    MeinString(int n) { /* reserviere n Bytes */ };
};
```

führen die Variablendefinitionen

```
MeinString s1 = 10;
s1 = 10;
MeinString s2 = 'A';
s2 = 'A';
```

zum Aufruf des *int*-Konstruktors, der 10 bzw. 65 (das Zeichen 'A' wird durch eine Standardkonversion in den *int*-Wert 65 konvertiert, da 'A' die Nummer 65 im Ascii-Zeichensatz hat) Zeichen für den String reserviert. Falls mit den Definitionen aber die Strings "10" oder "A" beabsichtigt waren, wird dieser Fehler vom Compiler nicht entdeckt. Gravierender als dieser Fehler dürfte aber ein Aufruf der Funktion

```
void f(MeinString s){}
```

mit einem *int*-Argument sein, der vom Compiler nicht entdeckt wird:

```
f(10); // führt zum Aufruf von f(MeinString(10))
```

Diese implizite Konversion des Arguments in den Datentyp eines Konstruktor-Parameters kann man unterbinden, indem man den Konstruktor mit dem Schlüsselwort **explicit** als **expliziten Konstruktor** definiert:

```
class C {
public:
    explicit C(T p) {}
};
```

Ein expliziter Konstruktor wird bei einer Initialisierung oder Zuweisung

```
C c = t; // Fehler: 'T' kann nicht in 'C' konvertiert werden
c = t;   // Fehler: 'T' kann nicht in 'C' konvertiert werden
```

nicht automatisch aufgerufen, um t in den Datentyp C zu konvertieren. Deswegen ist diese Initialisierung dann nur noch möglich, wenn t den Datentyp C hat bzw. den einer von C abgeleiteten Klasse. Ein expliziter Konstruktor kann nur mit einem Argument des Datentyps T

```
C c(t);
```

oder mit einer expliziten Konversion

```
C c = (C)t;
C d = C(t);
c = static_cast<C>(t);
```

aufgerufen werden.

Beispiel: Deklariert man den Konstruktor von

```
class MeinString {
public:
    explicit MeinString(int n) { /* reserviere n Bytes */ };
};
```

als *explicit*, sind nur noch explizite Konversionen möglich. Die Initialisierungen und Zuweisungen

```
MeinString s1 = 10; // Fehler: kann nicht konvertiert werden
s1 = 10;           // Fehler: kann nicht konvertiert werden
MeinString s2 = 'A'; // Fehler: kann nicht konvertiert werden
s2 = 'A';          // Fehler: kann nicht konvertiert werden
```

sowie der Aufruf

```
f(10);
```

sind dann nicht mehr möglich.

In C++03 waren nur Konstrukturen, die mit einem **einzigen Argument** aufgerufen werden können, konvertierende Konstrukturen. In C++11 können Konstrukturen auch mit Initialisierungsausdrücken (z.B. {1,2}) aufgerufen werden. Deshalb können in C++11 auch Konstrukturen als *explicit* gekennzeichnet werden, die **mit mehr als einem Argument** aufgerufen werden können.

Beispiel: Mit der Klasse

```
class C11 {
public:
    C11(int i, double d) {}
};
```

ist der *return*-Ausdruck in

```
C11 f11(C11 p)
{
    return{ 1, 3.14 };
}
```

und der Aufruf

```
f11({ 2, 1.41 });
```

möglich. Kennzeichnet man den Konstruktor in *C11* mit *explicit*, ist das nicht mehr möglich.

Da implizite Konversionen oft durchgeführt werden, ohne dass man es erwartet, wird oft empfohlen, alle Konstruktoren mit *explicit* zu definieren.

### Aufgabe 8.2.9

1. Die Klasse *Kreis* und die Funktion *show* sollen folgendermaßen definiert sein:

```
class Kreis {
    double r;
public:
    Kreis(double Radius = 1) :r(Radius) {}
};

void show(Kreis k){}

Kreis k;
```

a) Welche der folgenden Aufrufe werden kompiliert

```
show(k);
show(1);
```

b) Die Definitionen von oben sollen ergänzt werden durch

```
class Quadrat {
    double a;
public:
    Quadrat(double Seitenlaenge = 1):a(Seitenlaenge){};
};
```

```
void show(Quadrat k) {}
```

Welche der Aufrufe in a) werden jetzt kompiliert?

- c) Welche der Aufrufe unter a) werden kompiliert, wenn der Konstruktor von *Kreis* explizit ist?
- d) Welche der Aufrufe

```
Quadrat q;
```

```
show(k);
show(1);
show(q);
```

werden kompiliert, wenn die beiden Konstruktoren explizit sind?

### 8.2.10 Konversionsfunktionen mit und ohne *explicit* $\Theta$

Da ein Konstruktor ein Element einer Klasse sein muss, ist mit einem konvertierenden Konstruktor (siehe Abschnitt 8.2.9) nur eine Konversion in einen Klassentyp möglich. Wenn man einen Klassentyp in einen Datentyp konvertieren will, der keine Klasse ist (z.B. *int*), muss man in der Klasse eine **Konversionsfunktion** definieren.

Eine Konversionsfunktion definiert man in der Klasse, die konvertiert werden soll. Sie beginnt mit *operator* oder *explicit operator* und wird von dem Datentyp gefolgt, in den konvertiert werden soll. Der Rückgabotyp dieser Funktion ist immer der angegebene Datentyp. Sie muss eine *return*-Anweisung enthalten, die einen Wert dieses Datentyps zurückgibt. Parameter sind nicht zulässig.

Beispiel: Mit der Konversionsfunktion

```
class Bruch
{
    int z, n; // z: Zähler, n: Nenner
public:
    Bruch(int z_, int n_) :z(z_), n(n_) {}
    operator double()
    {
        return (double)z / n;
    }
};
```

kann eine Variable des Typs *Bruch* in *double* konvertiert werden:

```
Bruch b = { 1,2 };
double d = b;
```

Definiert man die Konversionsfunktion mit *explicit*, bezeichnet man diese als explizit. Dann ist keine implizite Konversion wie im letzten Beispiel möglich, sondern nur noch eine explizite.

Beispiel: Ändert man die Signatur der Konversionsfunktion im letzten Beispiel zu

```
explicit operator double()
```

ist nur noch eine explizite Konversion möglich:

```
double d1 = double(b);
double d2 = (double)b;
double d3 = static_cast<double>(b);
```

Konversionsfunktionen können vererbt werden und auch virtuell sein, aber nicht *static*.

Da implizite Konversionen leicht zu Mehrdeutigkeiten führen können, sollte man explizite Konversionen bevorzugen.

### 8.2.11 Statische Klassenelemente

Datenelemente und Elementfunktionen einer Klasse können mit dem Schlüsselwort **static** deklariert werden. Sie sind dann **statische Klassenelemente** und unterscheiden sich grundlegend von nicht statischen, da sie wie globale Variablen oder Funktionen unabhängig davon angesprochen werden können, ob ein Objekt der Klasse definiert wurde oder nicht.

Deshalb gelten viele Aussagen über nicht statische Elemente für statische Elemente nicht, weshalb diese bisher auch immer wieder explizit ausgeschlossen wurden. Zu den wenigen Gemeinsamkeiten gehört die Syntax, mit der ein Element über ein Objekt oder in einer Elementfunktion angesprochen wird. Außerdem müssen bei einem Zugriff **Zugriffsrechte** gegeben sein.

Für ein **statisches Datenelement** gilt:

- Seine Deklaration in einer Klasse ist **keine Definition**, sondern nur eine Deklaration. Deshalb muss man es außerdem noch global (eventuell in einem Namensbereich) definieren. Dazu muss der Name der Klasse und der Bereichsoperator „::“ verwendet werden:

```
struct C {
    static int ReferenceCount; // nur eine Deklaration, keine
                              Definition
    C()
    {
        ++ReferenceCount;
    };
    ~C()
```

```

{
    --C::ReferenceCount;
};
};

```

```

int C::ReferenceCount = 0; // Definition, zusätzlich zur Deklari-
                           tion notwendig

```

- Diese zusätzliche Definition wird leicht vergessen, da sie bei den häufiger verwendeten nicht statischen Datenelementen auch nicht notwendig ist. Seit C++11 ist diese zusätzliche Definition nicht mehr notwendig, wenn man das *static* Datenelement mit *inline* als sogenannte *inline*-Variable definiert. Mehr dazu siehe Abschnitt 8.2.12.

```

struct C {
    static inline int ReferenceCount = 0; // eine Definition, nicht
                                         nur eine Deklaration
}; // int C::ReferenceCount = 0; // nicht mehr notwendig

```

- Ein *static* Datenelement hat eine statische Lebensdauer und existiert wie eine globale oder lokale statische Variable während der gesamten Laufzeit eines Programms. Insbesondere existiert es unabhängig davon, ob ein Objekt der Klasse definiert wurde oder nicht. Man kann man es sowohl mit dem Namen der Klasse und dem Bereichsoperator als auch über ein Objekt der Klasse ansprechen.

Wenn mehrere Objekte einer Klasse angelegt werden, verwenden alle für ein statisches Datenelement denselben Speicherbereich. Deshalb wird in der Funktion *test* immer dieselbe Variable angesprochen. Aufgrund der Anweisungen im Konstruktor und im Destruktor zeigt diese an, wie viele Objekte einer Klasse angelegt sind.

```

void test()
{
    int x = C::ReferenceCount; // x = 0
    {
        C c;
        x = c.ReferenceCount; // x = 1
        C d;
        x = d.ReferenceCount; // x = 2
    } // Ruft den Destruktor für c und d auf
    x = C::ReferenceCount;    // x = 0
    C c;
    x = c.ReferenceCount;    // x = 1
}

```

- Es gehört nicht zu dem Speicherbereich, der für ein Objekt reserviert wird. Der von *sizeof* für eine Klasse zurückgegebene Wert berücksichtigt keine statischen Datenelemente.
- Da ein statisches Element unabhängig davon existiert, ob ein Objekt der Klasse definiert wird oder nicht, kann es auch dann verändert werden, wenn ein konstantes Objekt der Klasse definiert wird. Die Funktion *test* wird auch kompiliert, wenn man die Definition *c* der Variablen ändert in

```
const C c;
```

Die Regeln für die Kombination von *static* mit Initialisierungen, *const* und *constexpr* sind etwas undurchsichtig. Einige der folgenden Beispiele verwenden eine Klasse mit einem *constexpr*-Konstruktor:

```
class X
{
public:
    X(int x, int y) {}
    constexpr X(int x) {}
};
```

- Ein mit *static* und *const* deklariertes Element eines Ganzzahl- oder Aufzählungstyps mit einer Ganzzahlkonstanten initialisiert werden. Es ist dann ein „konstanter Ausdruck“ und kann für eine Arraydefinition verwendet werden. Mit einem nicht ganzzahligen Datentyp ist eine solche Initialisierung nicht möglich:

```
struct C {
    static const int max = 100;
    int a[max];           // das geht
    static const double pi = 3.14; // Fehler: double kann so nicht
                                // initialisiert werden
};
```

- Gibt man zusätzlich zu *static const* noch *inline* an, kann das Element einen beliebigen Datentyp haben und sowohl mit einem Gleichheitszeichen als auch mit einer Initialisierungsliste initialisiert werden:

```
class C_static_const_inline
{
    static const inline int x{ 17 };    // Das geht
    static const inline double d = 17; // Das geht
    static const inline double e{ 17 }; // Das geht
    static const inline string s = "";  // Das geht
    static const inline string t{ "" }; // Das geht
    static const inline X x{ 1 };       // Das geht
    static const inline X y{ 1,2 };     // Das geht
};
```

- Ein *static constexpr* Element kann nur mit einer Compilezeit-Konstanten initialisiert werden. Bei einem Element eines Klassentyps muss diese einen *constexpr*-Konstruktor haben:

```
class C_constexpr_static
{
    static constexpr int j = 17;
    static constexpr double k = 17;
    static constexpr string s = string(""); // Fehler: Muss
                                              // Konstante sein
    static constexpr string t{ "" }; // Fehler: Muss Konstante sein
};
```



```
static constexpr X x{ 1 };    // Das geht wegen dem constexpr-
                               Konstruktor
static constexpr X y{ 1,2 }; // Fehler: Muss Konstante sein
};
```

Für eine **statische Elementfunktion** gilt:

- Sie kann unabhängig davon aufgerufen werden, ob ein Objekt angelegt wurde oder nicht. Ihr Aufruf ist sowohl mit dem Namen der Klasse und dem Bereichsoperator „::“ als auch über ein Objekt möglich:

```
struct C {
    static void f() {};
};

void test()
{
    C::f();
    C c;
    c.f();
}
```

- Da sie ohne ein Objekt aufgerufen werden kann, wird ihr kein *this*-Zeiger übergeben. Sie kann deshalb auch keine nicht statischen Datenelemente ansprechen oder *virtual* oder *const* sein:

```
struct C {
    int i;
    static void f()
    {
        i = 1; // Fehler: Kein Zugriff auf C::i möglich
    };
};
```

Statische Datenelemente und Elementfunktionen können also im Wesentlichen wie globale Variablen und Funktionen verwendet werden. Sie haben aber gegenüber diesen die **Vorteile**:

- Die Anzahl der globalen Namen wird reduziert und damit auch die Gefahr von Namenskonflikten.
- Man kann explizit zum Ausdruck bringen, zu welcher Klasse ein Element inhaltlich gehört.
- Durch ihre Deklaration in einem *private* oder *protected* Abschnitt kann der Zugriff auf sie begrenzt werden.

Statische Elementfunktionen sind oft angemessen, wenn eine Funktion nur von ihren Argumenten und nicht von weiteren Klassenelementen abhängt.

Beispiel: Solche Funktionen kann man in einer Klasse zusammenfassen, deren Name eine Kategorie zum Ausdruck bringt, zu der Funktionen gehören:

```
class Utils {
public:
    static int Plus1(int x)
    {
        return x + 1;
    }
};
```

Die Funktion *Plus1* kann man dann folgendermaßen aufrufen:

```
int x = Utils::Plus1(1);
```

Statische Datenelemente und Elementfunktionen können wie die Elemente eines Namensbereichs (siehe Kapitel 9) angesprochen werden:

Beispiel: Die Elemente des Namensbereichs N können wie die Elemente der Klasse C angesprochen werden:

|                                                                                       |                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| <pre>struct C {     static void f() {}     static int x; };  C::f(); C::x = 17;</pre> | <pre>namespace N {     void f() {}     int x; }  N::f(); N::x = 17;</pre> |
|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|

Allerdings sind diese beiden Konzepte nicht gleichwertig. Die wichtigsten Unterschiede:

- Der Entwickler einer Klasse kann den Zugriff auf statische Klassenelemente mit *private* unterbinden. Das ist mit Namensbereichen nicht möglich.
- Mit einer *using*-Deklaration bzw. einer *using*-Direktive kann ein Element eines Namensbereichs ohne den Namen des Namensbereichs angesprochen werden. Eine solche Reduzierung des Schreibaufwands ist bei Klassen nicht möglich.
- Eine Klasse ist im Gegensatz zu einem Namensbereich ein Datentyp. Deshalb können statische Klassenelemente mit einer Klasse als Parameter übergeben werden. Das ist mit Namensbereichen nicht möglich.
- Klassen mit statischen Klassenelementen können vererbt werden. Auch das ist mit Namensbereichen nicht möglich.
- Namensbereiche können erweitert werden, ohne den Quelltext des Namensbereichs zu verändern. Das ist mit Klassen nicht möglich.

### Aufgaben 8.2.11

1. Definieren Sie eine Klasse *Singleton*, von der nur ein einziges Objekt erzeugt werden kann. Dazu soll sie eine Funktion *Instance* haben, die einen Zeiger auf dieses Objekt zurückliefert. Beim ersten Aufruf soll *Instance* ein neues Objekt erzeugen.

Die Verwaltung von Daten in einer solchen Klasse kann eine Alternative zu einer globalen Definition der Daten sein. Dadurch kann sichergestellt werden, dass mehrere

(auch lokale) Definitionen (durch einen Aufruf von *Instance*) immer dieselben Daten verwenden. Siehe dazu Gamma (1995, S. 127).

### 8.2.12 *inline* Variablen, insbesondere *static inline* Datenelemente

Bei der Definition einer Variablen mit einer statischen Speicherdauer (eine globale Variable, eine Variable auf einer namespace-Ebene oder ein *static* Datenelement einer Klasse) kann man seit C++17 wie bei einer *inline*-Funktion das Schlüsselwort *inline* angeben. Eine solche Variable wird dann als ***inline-Variable*** bezeichnet. Bei lokalen Variablen oder nicht *static* Datenelementen ist die Angabe *inline* nicht zulässig. *constexpr*-Variablen sind automatisch *inline*.

Beispiel: Zulässige und nicht zulässige Definitionen von *inline*-Variablen:

```
namespace N_static_inline
{
    inline int x; // auf namespace-Ebene oder global
    class C
    {
        inline int x; // Fehler: inline nur bei static Daten-
                       // elementen

        static inline int x; // das geht
        void f()
        {
            inline int x; // Fehler: lokale inline-Variablen gehen
                           // nicht
        }
    }
}
```

Diese beiden Definitionen

```
constexpr int i = 0;
inline constexpr int i = 0;
```

sind identisch.

Eine *inline*-Variable kann wie eine *inline*-Funktion in mehreren Übersetzungseinheiten (cpp-Dateien) definiert werden. Wenn der Linker mehrfache Definitionen desselben Namens in den object-Dateien findet, wählt er eine davon aus und betrachtet die anderen als dieselbe Variable.

Wenn man vor C++17 eine Variable in mehreren Übersetzungseinheiten (cpp-Dateien) verwenden wollte, musste man sie in einer einzigen Übersetzungseinheit definieren und in den anderen und allen eingebundenen Headern mit *extern* deklarieren.

Ein *inline*-Variable kann deshalb wie eine *inline*-Funktion in einer Header-Datei definiert werden, die von mehreren cpp-Dateien mit *#include* eingebunden wird. Damit können insbesondere statische Klassenelemente in einem Header definiert werden, und damit Klassen, deren gesamte Definition in einer Header-Datei enthalten ist, ohne dass eine cpp-Datei notwendig ist.

Beispiel: Gibt man bei einem Datenelement in einer Klasse *static* (ohne *inline*) an, ist das nur eine Deklaration und keine Definition:

```
class C
{
    static int x; // nur eine Deklaration, keine Definition
public:
    static void f()
    {
        x = 0;
    }
};
```

Das hat zur Folge, dass man eine Fehlermeldung des Linkers wie

```
Fehler LNK2001 Nicht aufgelöstes externes Symbol "private: static int C::x"
(?x@C@@@0HA)"
```

erhält. Diese Fehlermeldung ist aber für viele Programmierer kein Hinweis darauf, dass man eine explizite Definition

```
int C::x; // Definition in einer cpp-Datei
```

benötigt.

Bei einer Klasse, die nur in einer Header-Datei definiert wird, ist es besonders lästig, dass man für ein *static* Datenelement extra eine cpp-Datei anlegen muss. Und dass man die Definition in der cpp-Datei anpassen muss, falls man die Deklaration in der Klasse ändert.

Diese Definition außerhalb der Klasse ist seit C++17 mit ***inline static*** nicht mehr notwendig: Damit erhält man eine Definition und nicht nur eine Deklaration. Ein solches Element muss nicht mehr in einer extra cpp-Datei definiert werden.

Beispiel: Das Datenelement y

```
class C
{
    inline static int y; // eine Definition, nicht nur eine
                        Deklaration
public:
    static void f()
    {
        y = 1;
    }
};
```

benötigt keine extra cpp-Datei und kann über einen Header in mehrere cpp-Dateien eingebunden werden.

Ein kleiner Fallstrick besteht aber trotzdem noch: Falls eine *inline*-Variable in verschiedenen Übersetzungseinheiten mit unterschiedlichen Datentypen definiert wird, ist das Verhalten undefiniert.

Beispiel: Visual Studio bemängelt nicht, wenn eine *inline*-Variable in verschiedenen Übersetzungseinheiten unterschiedlich definiert ist:

```
inline int inlineVariable1; // in Datei1.cpp
inline double inlineVariable1; // in Datei2.cpp
```

### 8.2.13 Konstante Objekte und Elementfunktionen

Die Daten eines konstanten Objekts können nur bei der Definition, also im Konstruktor, gesetzt werden. Nach der Definition dürfen sie nicht mehr verändert werden. Deshalb ist der Aufruf einer Elementfunktion, die einen Wert eines konstanten Objekts verändert, nicht möglich.

Beispiel: Die Funktion *setze*

```
class C {
    int x = 0;
public:
    void setze (int v)
    {
        x = v;
    }
};
```

kann nicht mit dem konstanten Objekt *c* aufgerufen werden, da sie nicht konstant ist:

```
const C c;
c.setze(1); // Fehler: this-Zeiger kann nicht von 'const C'
           // in 'C &' konvertiert werden
```

Das gilt auch für *const* Parameter:

```
void f(const C& c)
{
    c.setze(1); // Fehler: this-Zeiger kann nicht von 'const
               // C' in 'C &' konvertiert werden
}
```

Diese Fehlermeldung würde man aber auch dann erhalten, wenn *setze* keine Daten verändern würde.

Damit eine Elementfunktion mit einem konstanten Objekt aufgerufen werden kann, muss gewährleistet sein, dass sie das Objekt nicht verändert.

- Das erreicht man mit dem Schlüsselwort *const* nach der Parameterliste. Dadurch übergibt der Compiler den *this*-Zeiger als *const C\* this* an die Funktion, so dass hat eine

Veränderung von *this*->*x* eine Fehlermeldung zur Folge hat. Eine solche Funktion wird als **konstante Elementfunktionen** bezeichnet.

Durch die Kennzeichnung einer Elementfunktion mit *const* dokumentiert man explizit, dass sie keine Datenelemente verändert. Da eine konstante Elementfunktion keine Daten eines Objekts verändern kann, kann sie auch die Klasseninvariante (siehe Abschnitt 8.1.7) nicht verändern. Deshalb wird empfohlen, alle solchen Elementfunktionen immer als *const* zu kennzeichnen.

- Da eine **statische Elementfunktion** keine Datenelemente eines Objekts verändern kann, kann eine statische Elementfunktion auch mit einem konstanten Objekt aufgerufen werden.

Beispiel: Ergänzt man die Funktion *setze* aus dem letzten Beispiel um *const*, akzeptiert der Compiler den Aufruf. Er erzeugt aber eine Fehlermeldung, da das Element *x* verändert wird:

```
void setze (int v) const
{
    x = v;
}
```

Entfernt man die Zuweisung aus *setze*, akzeptiert der Compiler die Funktion. In der Klasse

```
class C2DPunkt {
    double x, y;
public:
    C2DPunkt(double x_ = 0, double y_ = 0) :x(x_), y(y_) {}

    double X() const { return x; }
    double Y() const { return y; }

    string toStr() const
    {
        return "(" + std::to_string(X()) + "|" +
                    std::to_string(Y()) + ")";
    } // z.B. (2,345|3,45678)
};
```

können *X*, *Y* und *toStr* mit *const* definiert werden, da sie keine Klassenelemente verändern. Dann können diese Funktionen auch in einer Funktion mit einem konstanten Referenzparameter aufgerufen werden:

```
void show2(const C2DPunkt& p)
{
    cout << p.toStr() << endl;
}
```

Auch eine Operatorfunktion muss konstant sein, damit sie mit einem konstanten Objekt aufgerufen werden kann.

Beispiel: Für die Klasse *MeinString* kann eine konstante Operatorfunktion für den Indexoperator z.B. folgendermaßen aussehen:

```
class MeinString {
    char* s;
public:
    const char operator[](int i) const
    { // analog zu Abschnitt 8.2.4
        return *(s + i);
    };
};
```

Mit diesem Operator ist aber nur die erste der nächsten beiden Zuweisungen möglich:

```
MeinString s;
char c = s[2];
s[2] = 'c';
```

Damit man den Indexoperator mit einem konstanten String lesen und mit einem nichtkonstanten verändern kann, muss man zwei überladene Varianten definieren und auch die nächste in die Klasse aufnehmen:

```
char& operator[](int i)
{ // analog zu Abschnitt 8.2.4
    return *(s + i);
};
```

### Aufgaben 8.2.13

1. Überarbeiten Sie Ihre Lösungen der Klasse *Kreis* von Aufgabe 8.1.5, 3. so, dass diese als Wertparameter und als konstanter Referenzparameter an eine Funktion übergeben werden können, die die Funktion *toStr* aufruft:

```
void show1(Kreis k)          void show2(const Kreis& k)
{
    string s = k.toStr();    {
                                string s = k.toStr();
    }                        }
```

### 8.2.14 *std::function*: Ein Datentyp für Funktionen und aufrufbare Objekte

Seit C++11 kann man mit dem nach

```
#include <functional> // oder import std.core; (siehe Abschnitt 2.13)
```

verfügbaren Datentyp *std::function* einheitlich Objekte definieren, die Funktionen und andere aufrufbare Objekte darstellen. Damit sind keine unterschiedlichen Datentypen mehr notwendig, wenn man einem Parameter oder einer Variablen einen Funktionszeiger oder eine

Funktion usw. zuweisen will. Das ist vor allem bei **callback-Funktionen** von Vorteil: Damit bezeichnet man eine Funktion, die als Argument an eine Funktion übergeben werden.

`std::function` ist ein Klassen-Template, das in C++11 aufgenommen wurde und das auch als polymorpher Funktionswrapper bezeichnet wird. Damit ist gemeint, dass Objekte dieses Datentyps aufrufbare Objekte darstellen können. Hier ist „aufrufbare Objekte“ ein Oberbegriff für Funktionen (globale oder Elementfunktionen), Funktionsobjekte, Lambda-Ausdrücke und Funktionszeiger. Das soll im Folgenden am Beispiel von globalen Funktionen und Elementfunktionen illustriert werden.

Einen Datentyp, der eine Funktion

$$R f(T_1 x_1, T_2 x_2, \dots, T_n x_n)$$

mit dem Rückgabety `R` und Parametern mit den Datentypen `T1`, `T2` usw. darstellen kann, erhält man mit

**`std::function<R(T1, T2, ..., Tn)>`**

Die Argumente für `std::function` sind also die Datentypen des Rückgabewerts und der Parameter, die in derselben Reihenfolge angegeben werden wie bei der Definition der Funktion.

Beispiel: Eine **globale Funktion** mit einem `int`-Parameter und dem Rückgabety `string` wie

```
string g(int x)
{
    return "globale Funktion g, x="+std::to_string(x);
}
```

kann man einer Variablen des Typs

```
std::function<string(int)>
```

zuweisen. Diese Variable kann man dann wie eine Funktion aufrufen. Ihr Aufruf führt dann zum Aufruf der zugewiesenen Funktion:

```
std::function<string(int)> f = g;
string r1 = f(1); // r1=="globale Funktion g, x=1"
```

Normalerweise bringt es keinen Vorteil, eine Funktion über eine Variable aufzurufen. Man sieht aber an diesem Beispiel, wie man eine Funktion als Parameter an eine Funktion (hier `f1`) übergeben kann. Dazu übergibt man `f1` einen ersten Parameter des Typs `std::function`, bei dem man in spitzen Klammern im Wesentlichen die Signatur der aufzurufenden Funktion angibt. Für jeden weiteren Parameter der Parameter-Funktion gibt man einen Parameter des entsprechenden Typs an:

```
string f1(std::function<string(int)> f, int x)
{ // #include<functional>
    return f(x);
}
```



f1 kann dann folgendermaßen aufgerufen werden:

```
string r1 = f1(g, 17); // r1=="globale Funktion g, x=17"
```

Die Übergabe von Funktionen mit `std::function` ist aber etwas langsamer als der Aufruf über einen Funktionszeiger oder der Aufruf einer globalen Funktion:

| Benchmarks Visual Studio 2019.5, x64 Release /O2,<br>n= 10'000, Zeiten in Sekunden |           |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| globale Funktion aufrufen                                                          | 0,06 Sek. |
| globale inline Funktion aufrufen                                                   | 0,06 Sek. |
| Aufruf über Funktionszeiger                                                        | 0,12 Sek. |
| Aufruf über <code>std::function</code>                                             | 0,24 Sek. |
| Aufruf über Template Parameter                                                     | 0,12 Sek. |

**Statische Elementfunktionen** von Klassen (siehe Abschnitt 8.2.11) werden im Wesentlichen genauso verwendet. Hier muss man lediglich noch den Namen der Klasse und `::` vor dem Namen der Funktion angeben.

Beispiel: Mit der Klasse

```
struct C {
    static string s(int x)
    {
        return "statische Elementfunktion s, x=" +
            std::to_string(x);
    }
}
```

kann die Funktion `s` einer Variablen zugewiesen und als Parameter übergeben werden:

```
std::function<string(int)> f = C::s;
string r3 = f(3); // r3== "statische Elementfunktion s, x=3"
string r4 = f1(C::s, 5); // r4=="statische Elementfunktion
                        s, x=5"
```

Für die nächsten Beispiele wird eine Klasse `C` mit gewöhnlichen Elementfunktionen verwendet:

```
struct C {
    string m0() { return "m0"; }
    string m1(int x) { return "m1, x=" + std::to_string(x); }

    string m2(int x, string y)
    {
        return "m2, x=" + std::to_string(x) + " y=" + y;
    }
}
```

```
};
```

sowie ein Objekt *c* dieser Klasse:

```
C c;
```

Der Aufruf einer gewöhnlichen (**nicht statischen**) **Elementfunktion** über ein Objekt *c* ist etwas umständlicher. Die auf den ersten Blick vielleicht naheliegenden Ausdrücke

```
f1(c.m, 19); // Fehler: Keine Standardsyntax, & verwenden
f1(&c.m, 19); // Fehler: & ungültige Operation auf Ausdruck einer
               gebundenen Memberfunktion
```

sind nicht zulässig, da einer Elementfunktion als erster Parameter immer ein Zeiger auf die aktuelle Klasse übergeben wird. Dieses Problem lässt sich mit dem Funktions-Template ***bind*** lösen, das ebenfalls nach

```
#include <functional>
```

verfügbar ist. *bind* erzeugt ein zu *std::function* kompatibles Funktionsobjekt (mehr dazu siehe Abschnitt 13.3), das die Elementfunktion und einen Zeiger auf das Objekt enthält, und das wie eine Funktion aufgerufen werden kann. Dieser Aufruf führt dann zum Aufruf der Elementfunktion. Eine Elementfunktion *m* der Klasse *C* wird dabei mit der Schreibweise *&C::m* angegeben:

```
std::function<string()> f0 = std::bind(&C::m0, &c);
string s0 = f0();           // s0 = "m0"
```

Falls die Elementfunktion Parameter hat, muss man diese mit einem **Platzhalter** (placeholder) an *bind* übergeben. Das sind Datentypen mit den Namen *\_1*, *\_2*, *\_3* usw. für den ersten, zweiten, dritten usw. Parameter, die man *bind* übergeben kann. Sie stehen nach

```
using namespace std::placeholders;
```

zur Verfügung. Der erste Parameter des *bind*-Funktionsobjekts wird dann an der Position des Platzhalters *\_1*, der zweite an der Position des Platzhalters *\_2* usw. übergeben.

Beispiel: Die Elementfunktionen der Klasse *C* von oben können den folgenden *function*-Objekten zugewiesen werden:

```
std::function<string(int)> f2 = std::bind(&C::m1, &c,
                                         std::placeholders::_1);
string s1 = f2(1);           // s1 = "m1, x=1"
using namespace std::placeholders; // damit man nur _1
                                   schreiben muss
std::function<string(int, string)> f3 =
    std::bind(&C::m2, &c, _1, _2); // m2 hat 2 Parameter
string s2 = f3(2, "x");       // s2 = "m2, x=2 y=x"
```

In einer Elementfunktion wird bei der **Übergabe einer Elementfunktion** anstelle des Zeigers auf das Objekt der *this*-Zeiger übergeben.

Beispiel: Die Funktion `f1` von Seite 454 kann man in einer Elementfunktion von `C` mit dem Argument `C::m1` so aufrufen:

```
string r1 = f1(std::bind(&C::m1, this, _1), 15);
```

Da eine Elementfunktion einer Klasse `C` in eine Funktion übersetzt wird, die einen ersten Parameter des Datentyps `C*` hat, kann man eine Elementfunktion einem solchen Funktionstyp zuweisen. Das ist mit *mem\_fn* möglich. *mem\_fn* wird nur der Name der Elementfunktion übergeben. Der Zeiger auf das Objekt wird beim Aufruf übergeben.

Beispiel: Der *bind*-Ausdruck

```
std::function<string(C*)> f0 = std::bind(&C::m0, &c);
string s0 = f0(&c);           // s0 = "m0"
```

kann mit *mem\_fn* etwas vereinfacht werden. Die Elementfunktionen der Klasse `C` aus dem letzten Beispiel können so zugewiesen und aufgerufen werden:

```
std::function<string(C*)> f0 = std::mem_fn(&C::m0);
string s0 = f0(&c);           // s0 = "m0"
std::function<string(C*, int)> f1 = std::mem_fn(&C::m1);
string s1 = f1(&c, 1);        // s1 = "m1, x=1"
std::function<string(C*, int, string)> f2 =
std::mem_fn(&C::m2);
string s2 = f2(&c, 2, "x");    // s2 = "m2, x=2 y=x"
```

Bei älteren Compilern hat der Aufruf von Funktionen über *std::function*-Objekte oft spürbar länger gedauert als der direkte Aufruf. Bei neueren Compilern fällt der Unterschied kaum noch ins Gewicht.

Zum Schluss soll noch kurz gezeigt werden, wie Elementfunktionen mit der Syntax der „Zeiger auf Elementfunktionen“ als Parameter übergeben werden mussten, als es *std::function* noch nicht gab. Das nächste Beispiel soll nur die etwas kontraintuitive Syntax zeigen.

Beispiel: Eine Elementfunktion mit einem *int*-Parameter und einem *string*-Rückgabewert der Klasse `C` wird mit *string(C::\*pmf) (int)* an eine Funktion übergeben:

```
string call_old_style(string(C::*pmf) (int), C obj, int n)
{
    return (obj.*pmf)(n);
}
```

Diese Funktion kann man dann folgendermaßen aufrufen:

```
C c;
string s=call_old_style(&C::m1, c, 3); // s = "m1, x=3"
```

**Aufgabe 8.2.14**

1. Weisen Sie Variablen der folgenden *function*-Typen

```
function<void(void)>;
function<int(int x, string y)>;
function<string(int x)>;
```

eine passende

- a) globale Funktion zu.
- b) statische Elementfunktion einer Klasse zu
- c) nicht statische Elementfunktion einer Klasse zu
- d) einen passenden Funktionszeiger zu

und rufen Sie die Variable anschließend auf.

**8.2.15 Delegierende Konstruktoren Θ**

Verschiedene Konstruktoren mit im Wesentlichen den gleichen Aufgaben, aber unterschiedlichen Parameterlisten, werden in C++03 oft mit Default-Argumenten implementiert. Das geht aber nur, wenn die ersten Parameter gleich sind.

Beispiel: Wenn die Parameter der verschiedenen Konstruktoren nicht in derselben Reihenfolge kommen, ist eine Lösung mit Default-Argumenten nicht möglich. Dann schreibt man meist eine Init-Funktion, die in jedem der verschiedenen Konstruktoren aufgerufen wird. Dieser Aufruf kostet aber ein wenig Zeit, da der Standardkonstruktor trotzdem aufgerufen wird, und außerdem die Init-Funktion aufgerufen wird.

```
class C
{
public:
    C()
    {
        Init(0, "Success");
    }

    C(const string& message)
    {
        Init(-1, message);
    }

    C(int e, const string& message)
    {
        Init(e, message);
    }
}
```

```
private:
    void Init(int e, const string& message)
    {
        //...
    }
};
```

C++11 führt zur Lösung dieses Problems delegierende Konstruktoren ein. Damit kann ein Konstruktoraufruf an einen anderen Konstruktor delegiert werden. Dazu gibt man nach der Parameterliste des Konstruktors einen Doppelpunkt und den Namen des Konstruktors mit der Argumentliste an.

Beispiel: Das letzte Beispiel lässt sich mit delegierenden Konstruktoren folgendermaßen formulieren:

```
class C
{
public:
    C():C(0, "Success"){ }

    C(const string& message):C(-1, message){ };
    C(int e, const string& message)
    {
        // Anweisungen wie in Init
    }

private:
    // void Init(int e, const string& message)
    // nicht mehr notwendig
};
```

### 8.2.16 Klassen und Header-Dateien

Wenn man eine Klasse in verschiedenen Dateien eines Projekts verwenden will, hat man im Wesentlichen zwei Möglichkeiten:

**Entweder** nimmt man die Klassendefinition zusammen mit den Definitionen aller Elementfunktionen in eine Header-Datei (mit der Endung \*.h) auf. Alle Elementfunktionen sind dann *inline*-Funktionen (siehe Abschnitt 7.1). Für diese Klasse wird dann keine cpp-Datei benötigt.

**Oder** man verteilt die Klassendefinition und die Definitionen der Elementfunktionen auf zwei verschiedene Dateien:

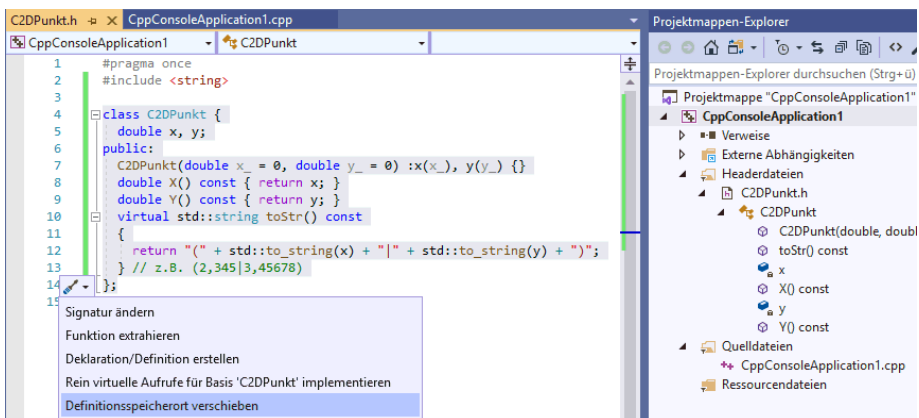
- In eine **Header-Datei**, deren Namen üblicherweise mit „h“ endet, nimmt man die Klassendefinition auf. Diese enthält nur Deklarationen der Elementfunktionen, aber keine Definitionen.
- Die Definition der Elementfunktionen erfolgt außerhalb der Klasse in einer Datei, die üblicherweise denselben Namen wie die Header-Datei hat, aber normalerweise die

Endung „.cpp“ anstelle von „.h“ hat. Die Deklarationen aus der Header-Datei werden dann mit einer `#include`-Anweisung in die cpp-Datei übernommen.

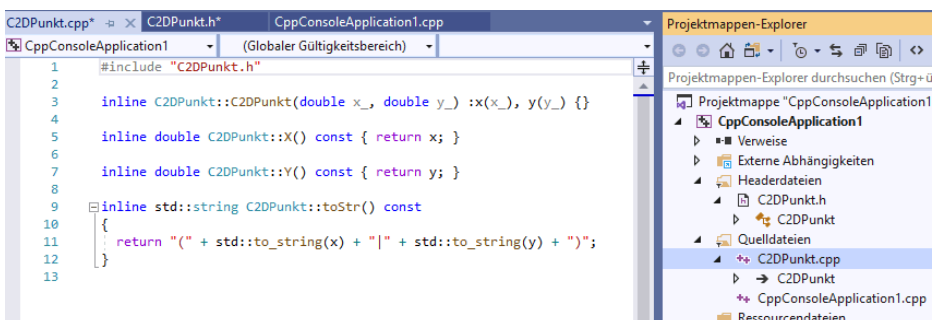
Oft definiert man jede Klasse in einem eigenen Paar solcher Dateien. Die Header-Datei nimmt man dann mit einer `#include`-Anweisung in alle Quelltexte auf, die diese Klasse benötigen. Visual Studio übersetzt jede cpp-Datei, die man dem Projekt hinzugefügt hat (z.B. mit *Projekt|Neues Element hinzufügen|Visual C++|Code|C++-Datei*) in eine obj-Datei und linkt diese beim Erstellen eines Projekts automatisch dazu.

In Visual Studio kann man ein solches Paar von Dateien einfach mit *Projekt|Klasse hinzufügen|Visual C++|C++|C++-Klasse* erzeugen. Die beiden Dateien werden dann dem Projekt hinzugefügt. Die hier von Visual Studio erzeugten Quelltexte kann man durch eigene Klassen ersetzen. Zwischen einer Header- und Cpp-Datei kann man im Kontextmenü des Editors mit „Header-/Codedatei umschalten“ wechseln.

In Visual Studio kann man die Definitionen aus einer Header-Datei in eine Cpp-Datei verschieben lassen. Dazu markiert man im Editor die Klasse und wählt im Kontextmenü „Schnellaktionen ...“ die Option „Definitionsspeicherort verschieben“:



Daraufhin verschiebt Visual Studio die Definitionen in die Cpp-Datei:



Wiederholt man diese Aktion, wird die Verschiebung wieder rückgängig gemacht.

Die Aufteilung einer Klassendefinition in eine Header- und cpp-Datei wird oft generell empfohlen, da sie mit kürzeren Kompilationszeiten verbunden ist. Bei modernen Compilern und nicht allzu großen Projekten ist dieser Unterschied aber oft nicht spürbar. Die ganze C++-Standardbibliothek ist in Header-Dateien definiert.

Für *inline*-Funktionen und Default-Argumente muss man beachten:

- Da der Compiler eine ***inline-Funktion*** nicht in die Object-Datei aufnimmt, muss eine *inline*-Funktion in eine Header-Datei aufgenommen werden. Definiert man eine *inline*-Funktion in einer cpp-Datei, hat das eine Fehlermeldung des Linkers („unresolved external“) zur Folge.
- **Elementinitialisierer** gibt man in der cpp-Datei und nicht in der Header-Datei an.
- **Default-Argumente** (siehe Abschnitt 2.4.8) gibt man in der Header-Datei an und nicht in der Implementationsdatei, da der Compiler die Default-Argumente sehen muss.

### Aufgaben 8.2.16

1. In den bisherigen Aufgaben wurden zur Vereinfachung alle Elemente einer Klasse meist in eine Header-Datei aufgenommen. In dieser Aufgabe sollen die Klassen von Aufgabe 8.1.5, 3. auf Header-Dateien und cpp-Dateien aufgeteilt werden.
  - a) Fügen Sie einem Projekt für jede der Klassen *Kreis* und *Quadrat* mit *Projekt|Klasse hinzufügen* eine Header-Datei und eine C++-Datei hinzu, auf die Sie dann die Deklarationen und die Definitionen verteilen. Rufen Sie einige der Elementfunktionen auf.  
 Falls sich Visual Studio weigert, diese Klassen anzulegen, weil Sie bereits Klassen mit diesen Namen in Ihrem Projekt haben, wählen Sie andere Namen für die Klassen (z.B. *Kreis0* oder *Quadrat0*)
  - b) Legen Sie mit einem Texteditor (z.B. Notepad) außerhalb von Visual Studio zwei Textdateien *Rechteck.cpp* und *Rechteck.h* für die Klasse *Rechteck* an und fügen Sie diese dem Projekt mit *Projekt|Vorhandenes Element hinzufügen* hinzu. Rufen Sie einige der Elementfunktionen auf.
  - c) Falls keine Ihrer Funktionen Default-Argumente hat, verwenden Sie bei mindestens einer Funktion Default-Argumente.
  - d) Definieren Sie in einer dieser Dateien mindestens eine globale *inline*-Funktion und rufen Sie diese auf.
  - e) Kennzeichnen Sie möglichst viele Elementfunktionen der Klassen *Quadrat* und *Kreis* aus Aufgabe 1 als *const*.

## 8.3 Vererbung und Komposition

Neben der Klassenbildung ist die Vererbung ein weiteres grundlegendes Konzept der objektorientierten Programmierung. Sie ermöglicht es, neue Klassen (die auch als abgeleitete Klassen bezeichnet werden) auf der Basis vorhandener Klassen zu definieren. Eine abgeleitete Klasse übernimmt (erbt) die Elemente der Basisklassen und kann zusätzliche

Elemente enthalten. Sie unterscheiden sich durch die zusätzlichen Elemente von den Basisklassen und sind in den übernommenen mit ihnen identisch.

Vererbung ermöglicht die Erweiterung einer Basisklasse. In der abgeleiteten Klasse können die Elemente der Basisklasse wiederverwendet werden:

- Dadurch erspart man sich die Wiederholung von Deklarationen.
- Da die abgeleitete Klasse nur die Erweiterungen enthält, kommen die Unterschiede der beiden Klassen explizit zum Ausdruck.
- Die abgeleitete Klasse unterscheidet sich von der Basisklasse nur in den Elementen, die nicht von ihr übernommen wurden. Auf diese Weise kann man Klassen konstruieren, bei denen bestimmte Elemente definitiv mit denen einer Basisklasse übereinstimmen, während andere Elemente diese erweitern.

Vererbung ist außerdem die Grundlage für virtuelle Funktionen, die dann im nächsten Abschnitt vorgestellt werden.

### 8.3.1 Die Elemente von abgeleiteten Klassen

Eine Klasse kann von einer oder mehreren Klassen abgeleitet werden. Dazu gibt man bei der Definition der abgeleiteten Klasse nach ihrem Namen einen „:“ und für jede Basisklasse einen *base-specifier* an:

```
base-clause:
    : base-specifier-list
```

Eine *base-specifier-list* besteht aus einer oder mehreren Angaben der Basisklasse (*base-specifier*). Das ist im einfachsten Fall

```
base-specifier: // stark vereinfachte Syntaxregel
    access-specifier virtualopt class-name
```

```
access-specifier:
    private
    protected
    public
```

Die abgeleitete Klasse enthält dann alle **Elemente** der Basisklassen **außer** den **Konstruktoren** und den Funktionen, die der Compiler automatisch für die Klasse erzeugt. Diese Übergabe von Elementen an abgeleitete Klassen bezeichnet man als **Vererbung**. Da *friend*-Funktionen keine Klassenelemente sind, werden diese auch nicht vererbt.

Beispiel: Die Klasse D wird von der Klasse C abgeleitet:

```
class C { // Basisklasse C
    int a, b, c;
public:
    void f() {};
};
```



```
class D : public C { // von C abgeleitete Klasse D
    double d;
};
```

D enthält die Datenelemente a, b, c und d. Die Funktion f kann sowohl über ein Objekt der Klasse C als auch über ein Objekt der Klasse D aufgerufen werden:

```
void test(C x, D y)
{
    x.f();
    y.f();
}
```

Eine abgeleitete Klasse kann wiederum als Basisklasse verwendet werden. So kann man eine im Prinzip unbegrenzte Folge von abgeleiteten Klassen konstruieren, die man auch als **Klassenhierarchie** bezeichnet.

Die bei der Definition einer abgeleiteten Klasse angegebene Basisklasse bezeichnet man auch als **direkte Basisklasse**. Eine Basisklasse, die keine direkte Basisklasse ist, heißt **indirekte Basisklasse**. Mit einer von C abgeleiteten Klasse D und einer von D abgeleiteten Klasse E ist dann auch E eine von C abgeleitete Klasse. Die Relation (im mathematischen Sinn) „ist abgeleitet von“ ist deshalb eine transitive Relation.

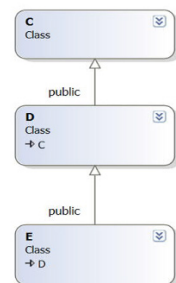
Beispiel: Mit den Klassen C und D aus dem letzten Beispiel ist E eine sowohl von C als auch von D abgeleitete Klasse:

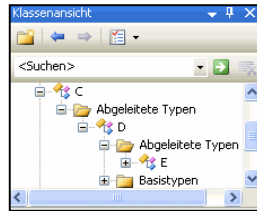
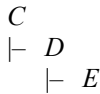
```
class E : public D { // von D abgeleitete Klasse E
    double e;
};
```

E enthält die Datenelemente a, b, c, d und e. C ist eine direkte Basisklasse von D und eine indirekte von E.

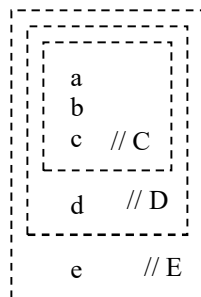
Zur grafischen Darstellung der Ableitungen in einer Klassenhierarchie verwenden der C++-Standard und UML Pfeile, die von einer abgeleiteten Klasse zur direkten Basisklasse zeigen. Die Pfeilrichtung bedeutet hier „ist direkt abgeleitet von“. Manche Autoren verwenden Pfeile, die gerade in die entgegengesetzte Richtung zeigen. Die Klassenhierarchie aus dem letzten Beispiel würde man dann wie in der Abbildung rechts darstellen:

Oft stellt man eine Klassenhierarchie aber auch dadurch dar, dass man abgeleitete Klassen eingerückt unter die Basisklasse schreibt. Die Text-Darstellung links wird im Folgenden gelegentlich für die Beispiele verwendet. Die Abbildung rechts erhält man in Visual Studio mit *Ansicht*|*Klassenansicht*:





Ein Objekt einer abgeleiteten Klasse enthält ein Objekt jeder Basisklasse, von der es abgeleitet wird. Dieses besteht aus den Elementen, die von der Basisklasse geerbt werden. Im C++-Standard wird ein solches Objekt einer Basisklasse auch als **Teilobjekt** („sub-object“) bezeichnet. Ein solches Teilobjekt hat keinen eigenen Namen, unter dem man es ansprechen kann. Der Compiler verwendet es aber z.B. bei den in Abschnitt 8.3.7 beschriebenen Konversionen. Das folgende Diagramm soll die verschiedenen Teilobjekte für ein Objekt der Klasse E aus den letzten Beispielen veranschaulichen.



In anderen Programmiersprachen werden anstelle von „Basisklasse“ und „abgeleitete Klasse“ oft andere Begriffe verwendet: In Eiffel „Vorfahr“ (ancestor) und „Nachkomme“ (descendant) und in Java „Oberklasse“ (super class) und „Unterklasse“ (sub class).

Gibt man nach dem Namen einer Klasse **final** an, kann von dieser Klasse nicht abgeleitet werden.

Beispiel: Von der Klasse C kann nicht abgeleitet werden:

```
class C final { };  
class D :public C {}; // Fehler: C keine zulässige Basisklasse
```

### 8.3.2 Zugriffsrechte auf die Elemente von Basisklassen

Wie die Syntaxregel für einen *base-specifier* zeigt, kann man vor der Basisklasse eines der **Zugriffsrechte** *public*, *protected* oder *private* angeben.

```
class C {  
};  
  
class D : public C { // anstelle von public ist auch  
};                  // private oder protected möglich
```

In Abhängigkeit vom hier angegebenen Zugriffsrecht bezeichnet man die Basisklasse auch als **public Basisklasse**, **protected Basisklasse** oder **private Basisklasse**. Die abgeleitete Klasse nennt man dann auch eine *public*, *protected* oder *private* abgeleitete Klasse.

Diese Art der Ableitung wirkt sich unter anderem auf die Zugriffsrechte auf die Elemente der Basisklassen aus. Vorläufig werden allerdings nur *public* abgeleitete Klassen verwendet. Da sie wesentlich beschränkter sind als bei *public* Basisklassen, ist die Angabe *public* bei der Ableitung in den folgenden Beispielen wichtig. Erfahrungsgemäß wird sie von Anfängern leicht vergessen, was dann zu Fehlermeldungen des Compilers führt.

Für eine *public* abgeleitete Klasse haben die Zugriffsrechte *private*, *protected* und *public* die folgende Bedeutung:

- Über ein Objekt einer abgeleiteten Klasse kann man wie über ein Objekt der aktuellen Klasse (siehe Abschnitt 8.1.3) nur auf *public* Elemente der Basisklasse zugreifen, aber nicht auf ihre *private* und *protected* Elemente.
- In einer abgeleiteten Klasse kann man nur auf die *public* und *protected* Elemente der Basisklasse zugreifen, aber nicht auf ihre *private* Elemente.
- Eine *friend*-Funktion kann auch *private* und *protected* Elemente verwenden.

|                  | Zugriff über ein Objekt der abgeleiteten Klasse | Zugriff in einer abgeleiteten Klasse |
|------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------|
| <i>public</i>    | ja                                              | ja                                   |
| <i>private</i>   | nein                                            | nein                                 |
| <i>protected</i> | nein                                            | ja                                   |

Beispiel: In einer Elementfunktion der Klasse *D* kann man nicht auf das *private* Element der Basisklasse *C* zugreifen:

```
class C {
    int priv; // private, da class
protected:
    int prot;
public:
    int publ;
};

class D : public C {
    int f()
    {
        int i = priv; // Fehler: Zugriff nicht möglich
        int j = prot; // das geht
        int k = publ; // das geht
    }
};
```

Über ein Objekt der Klasse *D* kann man nur auf das *public* Element von *C* zugreifen:

```

D d;
d.priv = 1; // Fehler: Zugriff nicht möglich
d.prot = 1; // Fehler: Zugriff nicht möglich
d.publ = 1; // das geht

```

In Abschnitt 8.1.3 wurde empfohlen, Datenelemente *private* und nicht *public* zu deklarieren, um den Bereich möglichst klein zu halten, in dem das Element verändert werden kann. Deshalb sollte man auch **protected Elemente vermeiden**, da sie nicht nur in der eigenen Klasse, sondern auch in einer abgeleiteten Klasse verändert werden können. Eine Klasse, die Datenelemente einer Basisklasse verwendet, stellt kein in sich geschlossenes Konzept dar.

Man bezeichnet die Elemente aus einem *protected* Abschnitt auch als Entwicklerschnittstelle, da sie vor einem Benutzer der Klasse verborgen sind und nur von einem Entwickler in einer abgeleiteten Klasse verwendet werden können.

### 8.3.3 Verdeckte Elemente

Eine abgeleitete Klasse enthält außer den in ihr definierten Elementen alle Elemente der Basisklassen. Das gilt auch dann, wenn in der abgeleiteten Klasse ein Element mit demselben Namen wie in der Basisklasse definiert wird. Falls ein solches Element keine virtuelle Methode (siehe Abschnitt 8.4) ist, sagt man auch, dass das Element der abgeleiteten Klasse das der Basisklasse **verdeckt**.

Gleichnamige Elemente in einer Klassenhierarchie sind aber außer bei virtuellen Funktionen meist nicht empfehlenswert. In Abschnitt 8.3.7 wird gezeigt, dass man **einer Funktion in einer abgeleiteten Klasse nie denselben Namen wie den in einer Basisklasse geben sollte, außer wenn die Funktion virtuell ist**. Die folgenden Ausführungen sind aber trotzdem wichtig: Sie sind die Grundlage, um später die Besonderheiten von virtuellen Funktionen zu sehen.

Wenn der **Name** eines Klassenelements verwendet wird (z.B. bei einem Funktionsaufruf), berücksichtigt der Compiler alle Deklarationen der Klasse sowie alle nicht verdeckten Namen der Basisklassen. Falls er dabei eine eindeutige Deklaration findet, wird diese verwendet. Falls keine oder mehr als eine gefunden wird, erzeugt er eine Fehlermeldung.

Beispiel: In den Klassen D und E wurden Funktionen mit dem gleichen Namen wie in den Basisklassen definiert:

```

struct C {
    void f1() {};
    void f2() {};
    void f3() {};
};

struct D : public C {
    void f1() {};
    void f3() {};
};

```

```
struct E : public D {
    void f1() {};
};
```

Da Funktionen vererbt werden, enthält die Klasse D zwei verschiedene Funktionen mit dem Namen f1 (C::f1 und D::f1), und E drei (C::f1, D::f1 und E::f1).

Die nächste Tabelle fasst zusammen, wie Aufrufe der Funktionen f1, f2 und f3 für Objekte der Klassen C, D und E übersetzt werden:

|      | C x   | D x   | E x   |
|------|-------|-------|-------|
| x.f1 | C::f1 | D::f1 | E::f1 |
| x.f2 | C::f2 | C::f2 | C::f2 |
| x.f3 | C::f3 | D::f3 | D::f3 |

Im Rest dieses Abschnitts geht es darum, wie man verdeckte Elemente ansprechen kann. Da man verdeckte Elemente vermeiden sollte, sind diese Ausführungen nur selten von Bedeutung. Sie können bei einer ersten Lektüre ausgelassen werden.

Falls ein Element einer Basisklasse in einer abgeleiteten Klasse nicht verdeckt wird, kann man es wie ein Element der abgeleiteten Klasse verwenden.

Beispiel: Die Klasse D definiert keine Elemente mit demselben Namen wie in C:

```
struct C { // struct: alles public
    int i;
    void f(string s) { };
    void f(int j) { i = j; }
};

class D : public C {
};
```

Deswegen kann man alle *public* Elemente aus C über ein Objekt der Klasse D ansprechen:

```
void test(D d)
{
    d.f(3);    // Aufruf von C::f(int)
    d.f("");   // Aufruf von C::f(string)
    d.f(2);    // Aufruf von C::f(int)
}
```

Ein verdecktes Element kann mit dem Namen seiner Klasse und dem Bereichsoperator „::“ angesprochen werden, wenn ein Zugriffsrecht besteht.

Beispiel: Ergänzt man die Klasse D aus dem letzten Beispiel um Elemente mit demselben Namen wie in der Basisklasse, kann man ein verdecktes Element der Basisklasse wie in D::f angesprochen werden:

```

class D : public C {
    int i;
public:
    void f(int j)
    {
        int di = i;    // i aus D
        int ci = C::i; // i aus C
        C::f(j + 1);    // f(int) aus C
    }
};

```

Eine **verdeckte Funktion** aus einer Basisklasse **wird** außer mit einer *using*-Deklaration (siehe anschließend) bei der Auflösung eines Funktionsaufrufs **nicht berücksichtigt**. Das gilt auch dann, wenn die Argumente exakt zu den Parametern der aufgerufenen Funktion in der Basisklasse und überhaupt nicht zu denen in der abgeleiteten Klasse passen.

Beispiel: Mit der Klasse D aus dem letzten Beispiel führt der Aufruf `d.f("")` zu einer Fehlermeldung des Compilers:

```

void test(D d)
{
    d.f(3);    // Aufruf von D::f(int)
    d.f("");   // Fehler: const char* nicht mit int kompatibel
    d.C::f(2); // Aufruf von C::f(int)
    d.C::f(""); // Aufruf von C::f(string)
}

```

Mit einer **using-Deklaration** kann man die Deklaration eines Namens aus einer Basisklasse in eine abgeleitete Klasse übernehmen. Dadurch wird das Element der Basisklasse in der abgeleiteten Klasse so behandelt, wie wenn es in der abgeleiteten Klasse deklariert wäre. Damit kann man erreichen, dass auch eine verdeckte Funktion aus einer Basisklasse bei einem Funktionsaufruf berücksichtigt wird.

Durch eine *using*-Deklaration erhält das Element das **Zugriffsrecht** des Abschnitts, in dem sie sich befindet. Deshalb kann man so das Zugriffsrecht auf ein Element einer Basisklasse in der abgeleiteten Klasse **ändern**. Voraussetzung dafür ist ein Zugriffsrecht auf das Element der Basisklasse.

Beispiel: Nimmt man in die Klasse D aus dem vorletzten Beispiel noch die *using*-Deklaration

```

class D : public C {
public:
    using C::f;

```

auf, ist der nächste Aufruf zulässig:

```
void test(D d)
{
    d.f("");    // jetzt geht das
}
```

Hätte man die *using*-Deklaration nicht in einen *public*-Abschnitt, sondern einen *private*-Abschnitt aufgenommen, wäre *f* in *D private*.

Seit C++11 kann man bei einer *using*-Deklaration auch den Namen eines Konstruktors einer direkten Basisklasse angeben. Dann kann der Konstruktor der Basisklasse auch zur Definition eines Objekts einer abgeleiteten Klasse verwendet werden (**vererbte Konstruktoren, inheriting constructors**, siehe Abschnitt 8.3.4).

### 8.3.4 Konstruktoren, Destruktoren und implizit erzeugte Funktionen

Eine abgeleitete Klasse enthält alle Datenelemente ihrer Basisklassen. In einem Objekt einer abgeleiteten Klasse können diese gemeinsam als ein Objekt der Basisklasse betrachtet werden. Ein solches Objekt einer direkten Basisklasse kann mit einem Elementinitialisierer initialisiert werden, der den Namen der Basisklasse und Argumente für einen Konstruktor der Basisklasse hat.

- Solche Elementinitialisierer für Basisklassen unterscheiden sich von den in Abschnitt 8.2.2 vorgestellten Elementinitialisierern für ein **Datenelement** einer Klasse nur dadurch, dass sie den Namen der Basisklasse und nicht den Namen des Datenelements verwenden.
- Wenn man für eine Basisklasse keinen solchen Elementinitialisierer angibt, wird das Objekt der Basisklasse mit seinem **Standardkonstruktor** initialisiert. Dann muss die Basisklasse einen solchen Konstruktor haben.
- Da man so keine Teilobjekte von indirekten Basisklassen initialisieren kann, muss man in jeder Klasse immer die der direkten Basisklassen initialisieren.

Beispiel: In den Klassen *D* und *E* initialisieren die Elementinitialisierer mit dem Namen der Basisklasse die Teilobjekte der jeweiligen Basisklasse:

```
class C {
    int i, j;
public:
    C(int x, int y) :i(x), j(y)
        { cout << "C: i=" << i << " j=" << j << endl;}
};

class D : public C {
    int k, a;
    C c;
public:
    D(int x, int y, int z) :C(x, y), a(1), c(y, z), k(z)
        { cout << "D: k=" << k << " a=" << a << endl; }
}; // C(x,y) initialisiert das Teilobjekt zur Basisklasse C

class E : public D {
    int m;
```

```
public:
    E(int x, int y, int z) :D(x, 3, z), m(z)
    { cout << "E: m=" << m << endl; }
}; //D(x,3,z) initialisiert das Teilobjekt zur Basisklasse D
```

Durch

```
E e(1, 2, 3);
```

erhält man die Ausgabe

```
C: i=1 j=3
C: i=3 j=3
D: k=3 a=1
E: m=3
```

Die **Reihenfolge**, in der die Elementinitialisierer angegeben werden, hat keinen Einfluss auf die Reihenfolge, in der die **Konstruktoren** der Elemente ausgeführt werden. Diese werden bei Klassen ohne Mehrfachvererbung immer in der folgenden Reihenfolge ausgeführt:

1. Die Konstruktoren der Basisklassen in der Reihenfolge, in der die Klassen voneinander abgeleitet sind (im letzten Beispiel also der von C zuerst).
2. Die nicht statischen Datenelemente in der Reihenfolge, in der sie in der Klasse definiert wurden.
3. Als letztes die Verbundanweisung des Konstruktors.

Damit beim Leser eines Programms nicht eventuell der irreführende Eindruck erweckt wird, dass die Elemente in der Reihenfolge der Elementinitialisierer initialisiert werden, wird empfohlen, diese Initialisierer immer in derselben Reihenfolge anzugeben, in der die Elemente in der Klasse definiert werden.

Die **Destruktoren** werden immer in der umgekehrten Reihenfolge ausgeführt, in der die Konstruktoren ausgeführt wurden. Durch diese Reihenfolge wird sichergestellt, dass ein später aufgerufener Destruktor keine Speicherbereiche anspricht, die von einem schon früher aufgerufenen Destruktor freigegeben wurden.

Betrachten wir nun ein etwas praxisnäheres Beispiel. Einen Punkt der Ebene kann man durch zwei Koordinaten  $x$  und  $y$  beschreiben und einen Punkt im Raum durch drei Koordinaten  $x$ ,  $y$  und  $z$ . Die Koordinaten eines *C2DPunkt* kann man in einem *C3DPunkt* wiederverwenden:

```
class C2DPunkt{
    double x,y;
public:
    C2DPunkt(double x_=0, double y_=0):x(x_),y(y_) {}

    void setzeX(double x_) {x=x_;}
    double X() const { return x; }
    void setzeY(double y_) { y=y_; }
    double Y() const { return y; }
```



```

string toStr()const
{
    return "(" + std::to_string(x) + "|" + std::to_string(y) + ")";
} // z.B. (2,345|3,45678)

void anzeigen() const
{
    cout << toStr() << endl;
}
};

```

Diese Klasse kann man als Basisklasse für die Klasse *C3DPunkt* verwenden:

```

class C3DPunkt:public C2DPunkt{
    double z;
public:
    C3DPunkt(double x_=0, double y_=0, double z_=0):C2DPunkt(x_,y_),
                                                    z(z_){}

    void setzeZ(double z_) { z=z_; }
    double Z() const { return z; }

    string toStr()const
    {
        return "(" + std::to_string(X()) + "|" + std::to_string(Y())
                + "|" + std::to_string(z) + ")";
    } // z.B. (2,34|3,45|4,56)

    void anzeigen() const
    {
        cout << toStr() << endl;
    }
};

```

*C3DPunkt* erbt von der Basisklasse *C2DPunkt* die Datenelemente *x* und *y*. Damit ihre Werte auch in einer abgeleiteten Klasse verfügbar sind, wurden die public Elementfunktionen *X* und *Y* definiert:

Den Konstruktor der Basisklasse kann man beim Konstruktor der abgeleiteten Klasse als Elementinitialisierer angeben:

```

C3DPunkt(double x_=0, double y_=0, double z_=0): C2DPunkt(x_,y_),
                                                    z(z_){}

```

Die Elementfunktionen *toStr* und *anzeigen* der Basisklasse werden verdeckt.

Mit den Definitionen

```

C2DPunkt p2(1, 2);
C3DPunkt p3(1, 2, 3);

```

und den Anweisungen

```
p2.anzeigen();
p3.anzeigen();
```

erhält man dann die Ausgabe:

```
(1 | 2)
(1 | 2 | 3)
```

Konstruktoren, Destruktoren und die Operatorfunktion für den Zuweisungsoperator werden nicht an eine abgeleitete Klasse vererbt. Da sie nur die Elemente ihrer Klasse kennen, können sie zusätzliche Elemente der abgeleiteten Klasse nicht berücksichtigen und deshalb ihre Aufgaben nicht erfüllen. In C++11 wurde allerdings die Möglichkeit aufgenommen, die Konstruktoren einer Basisklasse mit sogenannten „inheriting constructors“ (siehe die Ausführungen am Ende dieses Abschnitts) zu übernehmen.

Deshalb werden auch bei abgeleiteten Klassen vom Compiler Funktionen für einen Standard- oder Kopierkonstruktor, einen Zuweisungsoperator oder einen Destruktor **implizit erzeugt**, wenn diese nicht explizit definiert werden:

- Der implizit definierte **Standardkonstruktor** ist eine Funktion mit einem leeren Anweisungsteil (siehe Abschnitt 8.2.1). Da er keine Elementinitialisierer enthält, werden alle Teilobjekte der Klasse mit ihrem Standardkonstruktor initialisiert.
- Der implizit definierte **Kopierkonstruktor** kopiert alle Teilobjekte der Klasse. Falls diese Teilobjekte Klassen sind, wird dazu der Kopierkonstruktor für diese Klassen verwendet.
- Der implizit definierte **Zuweisungsoperator** kopiert alle Teilobjekte der Klasse. Falls sie Klassen sind, wird dazu ihr Zuweisungsoperator verwendet.
- Der implizit definierte **Destruktor** ruft die Destruktoren aller Teilobjekte auf.

Falls eine abgeleitete Klasse keine Elemente (z.B. zusätzliche Zeiger) enthält, für die spezielle Operationen notwendig sind, reichen die implizit erzeugten Funktionen aus. Falls sie aber solche Elemente enthält, müssen diese Funktionen explizit definiert oder ihr Aufruf durch eine *private*-Deklaration unterbunden werden. Vergisst man die Definition einer dieser Funktionen in der abgeleiteten Klasse, wird man vom Compiler allerdings nicht auf diesen Fehler hingewiesen: Er ruft dann einfach die implizit erzeugten Funktionen auf.

Bei der Definition dieser Funktionen müssen alle Elemente der Klasse berücksichtigt werden, also nicht nur die der abgeleiteten Klasse, sondern auch die der Basisklasse. Falls man diese einzeln anspricht, besteht die Gefahr, dass nach einer Erweiterung der Basisklasse vergessen wird, die zusätzlichen Elemente auch in der abgeleiteten Klasse zu berücksichtigen. Diese Gefahr kann man vermeiden, indem man die entsprechende Funktion der Basisklasse aufruft:

- Bei den Konstruktoren ist das mit einem Elementinitialisierer möglich. Das gilt insbesondere auch für den Kopierkonstruktor, der so den Kopierkonstruktor der Basisklasse aufrufen kann:

```
D(const D& d) :C(d) // C(d): Aufruf des Kopierkonstruktors für
{                //      das Teilobjekt der Basisklasse C
    // Konstruiere die zusätzlichen Elemente von D
}
```

- Im Zuweisungsoperator ruft man den Zuweisungsoperator der Basisklasse auf. Dadurch werden die Elemente der Basisklasse zugewiesen:

```
D& operator=(const D& rhs) // Basisklasse C,
{                          // abgeleitete Klasse D
    if (this == &rhs) return *this;
    C::operator=(rhs); // Aufruf von this->C::operator=
                       // . Kopiere die zusätzlichen Elemente von D
    return *this;
};
```

Hier wird der Zuweisungsoperator der Basisklasse über den Namen *operator=* aufgerufen, da man die Basisklasse nicht vor dem Operator angeben kann (*C::rhs* geht nicht).

Seit C++11 kann man die Konstruktoren einer Basisklasse C mit der *using*-Deklaration

```
using C::C;
```

in eine abgeleitete Klasse übernehmen („**inheriting constructors**“). Dadurch werden alle Konstruktoren übernommen: Es ist nicht möglich, nur einen Teil der Konstruktoren zu vererben. Die geerbten Konstruktoren haben dieselben Zugriffsrechte wie die der Basisklasse. Deshalb kann die *using*-Deklaration auch in einem *private* Abschnitt enthalten sein.

Das macht aber normalerweise nur dann Sinn, wenn die abgeleitete Klasse nicht mehr Datenelemente als die Basisklasse hat (z.B. eine Interface-Klasse – siehe Abschnitt 8.4.11), oder die zusätzlichen Datenelemente bei ihrer Definition initialisiert werden können.

Beispiel: Bei einer dependency injection gibt ein Konstruktor einer abgeleiteten Klasse oft nur das Argument an die Basisklasse weiter:

```
class IDependency {};
```

```
class C {
    IDependency* p;
public:
    C(IDependency* q) : p(q) {}
};
```

```
class D : public C {
public: // Der Konstruktor macht nichts anderes als das
      // Argument an die Basisklasse weitzugeben
    D(IDependency* p) : C(p) {}
};
```

Diesen Konstruktor von D kann man sich mit einer *using*-Deklaration ersparen:

```
class D :public C
{
    using C::C; // muss nicht in einem public Abschnitt sein
};
```

Wenn eine abgeleitete Klasse, die Konstruktoren erbt, zusätzliche Element hat, müssen diese bei ihrer Definition initialisiert werden:

```
struct E : public D {
    int n = 0; // zusätzliches Element bei der Definition
                initialisieren
    // using C::C; // Fehler: nur Konstruktoren der direkten
                Basisklasse können vererbt werden
    using D::D; // Die Konstruktoren aus D erben. Das D die
};           // Konstruktoren von C erbt, hat auch E die von C.
```

Deswegen können Objekte der Klassen D und E so initialisiert werden:

```
Dependency* p = new Dependency(); // class
                                   Dependency:public IDependency {}
D d(p);
E e(p);
```

#### Aufgaben 8.3.4

1. Welche Ausgabe erhält man durch einen Aufruf der Funktion *test*?

```
class C {
    int i, j;
public:
    C(int x, int y) : i(x), j(y)
    {
        cout << "Konstr C" << endl;
    }

    C() : i(0), j(0)
    {
        cout << "Std-Konstr C" << endl;
    }

    ~C()
    {
        cout << "Destruktor C" << endl;
    }
};
```

```

class D : public C {
    int k, a, b;
    C c;
public:
    D(int x = 1) :c(x, 1), a(x), b(0), k(19)
    {
        cout << "Konstr-1 D" << endl;
    }

    D(int x, int y, int z) :C(x, y), a(1), b(2), c(x, y), k(z)
    {
        cout << "Konstr-2 D" << endl;
    }

    ~D()
    {
        cout << "Destruktor D" << endl;
    }
};

class E : public D {
    int m;
    C c;
    D b;
public:
    E(int x, int y) :b(y), c(2, 3), m(x + y)
    {
        cout << "Konstr E" << endl;
    }

    ~E()
    {
        cout << "Destruktor E" << endl;
    }
};

void test()
{
    C c(1, 2);
    D d(1, 2, 3);
    E e(1, 2);
}

```

2. Einen eindimensionalen Punkt kann man sich als Zahl auf einem Zahlenstrahl vorstellen. Definieren Sie analog zu den Beispielen im Text eine Klasse *C1DPunkt*, die eine Zahl darstellt. Von dieser Klasse soll *C2DPunkt* und von *C2DPunkt* soll *C3DPunkt* abgeleitet werden. Definieren Sie für jede dieser Klassen Konstruktoren, die alle Koordinaten initialisieren, sowie Funktionen *toStr* und *anzeigen* wie im Text.
3. Manchmal hat man mehrere Möglichkeiten, Klassen voneinander abzuleiten:

- a) Da ein Quadrat eine und ein Rechteck zwei Seitenlängen hat, kann man eine Klasse für ein Rechteck von einer Klasse für ein Quadrat ableiten und so die Seitenlänge des Quadrats im Rechteck verwenden.
  - b) Man kann ein Quadrat aber auch als Rechteck mit zwei gleichen Seiten betrachten. Definieren Sie eine Basisklasse für ein Rechteck und leiten Sie von dieser eine Klasse für ein Quadrat ab, bei der im Konstruktor die beiden Seitenlängen auf denselben Wert gesetzt werden.
  - c) Liefert eine in a) und b) definierte Funktion für den Umfang auch in der abgeleiteten Klasse das richtige Ergebnis?
  - d) Vergleichen Sie die Vor- und Nachteile der beiden Hierarchien.
4. Die Klassen der C++-Standardbibliothek kann man ebenso wie jede andere Klasse als Basisklasse für eigene abgeleitete Klassen verwenden. Da die Klasse *string* z.B. keinen Konstruktor hat, der ein *int*- oder *double*-Argument in einen String umwandelt, kann man eine abgeleitete Klasse mit einem solchen Konstruktor definieren. Welche Vor- und Nachteile sind mit einer solchen Erweiterung verbunden?

### 8.3.5 OO Design: *public* Vererbung und „ist ein“-Beziehungen

Vererbung bedeutet, dass eine abgeleitete Klasse alle Elemente der Basisklasse enthält. Sie kann auch mehr Elemente enthalten, aber nie weniger. Daraus ergeben sich die folgenden Beziehungen zwischen einer Basisklasse und einer abgeleiteten Klasse:

1. Da eine abgeleitete Klasse alle Elemente der Basisklasse enthält, kann ein Objekt einer abgeleiteten Klasse wie ein Objekt der Basisklasse verwendet werden, wenn in der abgeleiteten Klasse keine Elemente aus der Schnittstelle der Basisklasse verdeckt werden. Insbesondere können über ein Objekt der abgeleiteten Klasse alle Elementfunktionen aus der Schnittstelle der Basisklasse aufgerufen werden.

In Abschnitt 8.3.7 wird gezeigt, dass man verdeckte Funktionen vermeiden sollte. Dann ist jedes Objekt einer abgeleiteten Klasse auch ein Objekt der Basisklasse. Man sagt deshalb auch, dass zwischen einer abgeleiteten Klasse und einer Basisklasse eine „**ist ein**“-Beziehung besteht.

2. Da eine abgeleitete Klasse mehr Elemente als die Basisklasse haben kann, ist die abgeleitete Klasse eine speziellere Klasse als die Basisklasse. Die Basisklasse ist dagegen eine allgemeinere Klasse als eine abgeleitete Klasse, da sie alle Gemeinsamkeiten der abgeleiteten Klassen enthält. Deshalb bezeichnet man eine Basisklasse auch als **Verallgemeinerung** oder **Generalisierung** einer abgeleiteten Klasse und eine abgeleitete Klasse als **Spezialisierung** der Basisklasse.

Die **Konsistenzbedingungen** für ein Objekt einer abgeleiteten Klasse bestehen aus denen für ein Objekt der Basisklasse sowie eventuell weiteren Bedingungen für die Datenelemente der abgeleiteten Klasse. Die **Klasseninvariante** einer abgeleiteten Klasse besteht also aus der Klasseninvarianten der Basisklasse, die mit einem logischen *und* mit weiteren Bedingungen verknüpft ist.

Da eine Funktion aus einer Basisklasse auch mit einem Objekt einer abgeleiteten Klasse aufgerufen werden kann, muss der **Aufruf einer Funktion der Basisklasse auch mit jedem**

**Objekt einer abgeleiteten Klasse das richtige Ergebnis** haben. Deshalb muss man bei einer Vererbung immer prüfen, ob jede Funktion aus der Schnittstelle der Basisklasse auch für ein Objekt einer abgeleiteten Klasse sinnvoll ist. Falls das nicht zutrifft, sollte man die Klassen auch nicht voneinander ableiten. Außerdem darf eine Funktion der Basisklasse **nie** die **Klasseninvariante** der abgeleiteten Klasse **zerstören**.

Beispiele: 1. Ein Quadrat kann als Rechteck mit zwei gleichen Seiten dargestellt werden:

```
class Rechteck {
    double a, b;
public:
    Rechteck(double a_, double b_) :a(a_), b(b_) {};
    double Flaeche() { return a*b; };
    double Umfang() { return 2 * (a + b); };
};

class Quadrat :public Rechteck {
public:
    Quadrat(double a_) :Rechteck(a_, a_) {}
};
```

In dieser Hierarchie liefern die Funktionen *Flaeche* und *Umfang* auch für ein Objekt der abgeleiteten Klasse richtige Ergebnisse.

Die Klasseninvariante von *Quadrat* besteht hier aus der Klasseninvarianten *true* für das Rechteck und der zusätzlichen Bedingung  $a=b$ .

2. Ergänzt man die Klasse *Rechteck* aus 1. um die Funktion *setzeSeitenlaengen*, dann kann diese Funktion auch über ein *Quadrat* aufgerufen werden. Da ein solcher Aufruf im Quadrat die Gleichheit der beiden Seitenlängen zerstören kann, ist die Ableitung eines Quadrats von einem solchen Rechteck nicht angemessen:

```
class Rechteck{
    double a, b;
public:
    Rechteck(double a_, double b_) :a(a_), b(b_){};
    void setzeSeitenlaengen(double a_, double b_)
    {
        a = a_;
        b = b_;
    }
    double Flaeche() { return a*b; };
    double Umfang() { return 2 * (a + b); };
    string toStr()const
    {
        return "Rechteck mit den Seitenlängen " +
            std::to_string(a) + " und " + std::to_string(b);
    }
};
```

Auch die Funktion *toStr* ist für ein Quadrat nicht unbedingt korrekt. Zwar ist die Meldung „Rechteck mit den Seitenlängen 1 und 1“ für ein Quadrat nicht falsch. Aber ein spezieller Text für ein Quadrat wie „Quadrat mit der Seitenlänge 1“ wäre besser.

Offensichtlich kann die Funktion *setzeSeitenlaengen* die Klasseninvariante der abgeleiteten Klasse zerstören.

Eine Klasse stellt meist ein Konzept der Realität dar (siehe Abschnitt 8.1.7). In diesem Beispiel werden die Konzepte „Quadrat“ und „Rechteck“ durch die Klassen *Quadrat* und *Rechteck* dargestellt. Dabei ist im ersten Fall eine Vererbung gerechtfertigt und im zweiten Fall nicht. Deshalb zeigt dieses Beispiel, dass **die Konzepte allein keine Entscheidung darüber ermöglichen**, ob eine Vererbung bei den Klassen sinnvoll ist, die diese Konzepte darstellen.

Bei der Klassenhierarchie des letzten Beispiels kommen zwei renommierte Autoren mit ähnlichen Namen zu völlig unterschiedlichen Ergebnissen und haben trotzdem beide recht:

- Scott Meyers (1998, S. 159) leitet eine Klasse für ein Quadrat von einer Klasse für ein Rechteck ab und definiert für die Basisklasse eine Funktion, die wie die Funktion *setzeSeitenlaengen* die beiden Seitenlängen des Rechtecks setzt. Da ein Aufruf dieser Funktion in einem *Quadrat* die Bedingung zerstört, dass beide Seitenlängen gleich sind, ist nach seiner Meinung die *public* Ableitung eines Quadrats von einem Rechteck völlig falsch.
- Bertrand Meyer (1997, S. 826-827) leitet ebenfalls eine Klasse für ein Quadrat von einer Klasse für ein Rechteck ab. Allerdings verlangt er, dass alle Funktionen, die mit einem Quadrat aufgerufen werden können, die Gleichheit der Seitenlängen nicht zerstören. Deshalb ist hier eine *public* Vererbung korrekt. Der Preis für diese Hierarchie ist aber, dass die Klasse *Rechteck* keine Funktion haben darf, die die beiden Seitenlängen auf verschiedene Werte setzt. Bei einem Zeichenprogramm, bei dem die Größe der Figuren verändert werden muss, ist eine solche Einschränkung aber oft nicht akzeptabel.

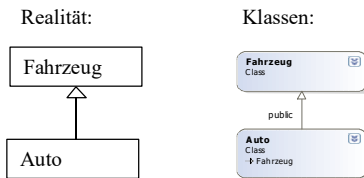
Stroustrup (1997, Abschnitt 23.4.3.1) vertritt am Beispiel von Kreisen und Ellipsen die Ansicht, dass man meistens weder ein Rechteck von einem Quadrat noch ein Quadrat von einem Rechteck ableiten soll. Wir werden auf dieses Beispiel in Abschnitt 8.4.9 zurückkommen und dann eine Hierarchie finden, die nicht mit diesen Problemen verbunden ist.

Booch (1994, Kapitel 4) und Meyer (1997) beschäftigen sich ausführlich mit der historischen Entwicklung der Klassifikationen in der Biologie, Chemie, Philosophie usw. Diese Entwicklung zeigt, dass verschiedene Sichtweisen und Zielsetzungen zu völlig anderen Hierarchien führen können.

Beispiel: Nach Booch (1994, S. 148) wurden in früheren Klassifikationen der Biologie Tiere nach ihrem Körperbau, inneren Merkmalen und evolutionären Beziehungen klassifiziert. Neuere Klassifikationen beruhen auf Ähnlichkeiten der DNA. Nach den DNA-Klassifikationen haben Lungenfische mehr Gemeinsamkeiten mit Kühen als mit Forellen.



Wenn eine **Klasse** ein Konzept der Realität darstellt, **wird** sie meist **mit** diesem **Konzept identifiziert**. Dann sollte man darauf achten, dass zwischen den Klassen dieselben Beziehungen bestehen wie zwischen den Konzepten, die sie darstellen. Da zwischen einer Basisklasse und einer abgeleiteten Klasse eine „ist ein“-Beziehung besteht, sollte deshalb auch zwischen ihren Konzepten eine „ist ein“-Beziehung bestehen. Deswegen sollte man **nur solche Klassen voneinander ableiten**, bei denen auch **für die Konzepte eine „ist ein“-Beziehung besteht** und die **Verallgemeinerungen bzw. Spezialisierungen voneinander sind**. Falls das nicht gilt, führt die Hierarchie leicht zu **Problemen**. Typische Probleme mit einer solchen Hierarchie werden in Abschnitt 8.4.9 gezeigt.



In dieser Abbildung soll der Pfeil eine „ist ein“-Beziehung darstellen. Diese Beziehung soll nicht nur für die Klassen, sondern auch für die Konzepte der Realität gelten.

Wenn eine Klasse von einer Basisklasse abgeleitet wird, damit sie ihre Datenelemente verwenden kann, besteht zwischen den Konzepten, die die Klassen darstellen, oft keine „ist ein“-Beziehung.

Beispiel: In Abschnitt 8.3.4 wurde die Klasse *C3DPunkt* von *C2DPunkt* abgeleitet, damit sie Datenelemente der Basisklasse wiederverwenden kann:

```
class C2DPunkt {
    double x, y;
    // ...
};

class C3DPunkt : public C2DPunkt {
    double z; //C3DPunkt enthält die Elemente x,y,z
    // ...
};
```

Allerdings wird kaum jemand sagen, dass jeder Punkt im Raum auch ein Punkt in der Ebene ist. Ein 3D-Punkt hat 3 Koordinaten, und ein 2D-Punkt 2.

Als **Kriterium für eine „ist ein“-Beziehung** sollten also **nicht nur die Konzepte an sich** oder **die Datenelemente** betrachtet werden, sondern vor allem die **Elementfunktionen der Schnittstelle**. Eine Klasse hat meist nur den Sinn und Zweck, von einem Anwender benutzt zu werden. Dafür stehen ihm die Elemente ihrer Schnittstelle zur Verfügung, und das sind normalerweise Elementfunktionen und keine Datenelemente. Da zu den **Datenelementen** aber oft auch *get*- oder *set*-Funktionen gehören, sind sie über diese Funktionen **doch** wieder ein **Kriterium** für eine „ist ein“-Beziehung.

Booch (1994, S. 59 und S. 112) bezeichnet eine „ist ein“-Beziehung als Lackmus-Test für die Vererbung: Falls für zwei Klassen C und D die Beziehung „D ist ein C“ nicht gilt, soll D

auch nicht von C abgeleitet werden. Meyer (1997, S. 811) ist nicht ganz so streng und verlangt lediglich, dass sich vernünftige Gründe für eine solche Interpretation finden lassen sollten.

Allerdings muss nicht jede Klassenhierarchie, die keine „ist ein“-Beziehung darstellt, zu Problemen führen. Wir werden die Hierarchie mit dem *C2DPunkt* und dem *C3DPunkt* in Abschnitt 8.4.2 ganz nützlich finden. Probleme mit solchen Hierarchien werden wir in Abschnitt 8.4.9 sehen und sie dann durch eine andere Hierarchie ersetzen.

Die bisherigen Beispiele in diesem Abschnitt waren nicht immer einfach und sollten vor allem zeigen, worauf man beim Entwurf einer Klassenhierarchie achten sollte. Das bedeutet aber nicht, dass der Entwurf einer Klassenhierarchie immer kompliziert ist. Im realen Leben findet man viele Konzepte, die **Verallgemeinerungen bzw. Spezialisierungen** voneinander sind. Solche Konzepte lassen sich **meist ohne Probleme** durch Klassen in einer Hierarchie darstellen.

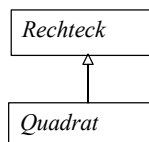
Beispiele: Jedes Auto ist ein Fahrzeug. Deswegen kann eine Klasse für ein Auto meist von einer Klasse für ein Fahrzeug abgeleitet werden. Da ein Girokonto ein spezielles Konto ist, spricht meist nichts gegen die Ableitung einer Klasse für ein Girokonto von einer Klasse für ein Konto.

Dass zwischen einer abgeleiteten Klasse und einer Basisklasse eine „ist ein“-Beziehung bestehen soll, darf allerdings **nicht** dazu verleiten, **jede umgangssprachliche „ist ein“-Formulierung** durch eine Vererbung darzustellen.

- Eine „ist ein“-Beziehung darf nur als **notwendige Bedingung** verstanden werden: Ist sie für die zugrundeliegenden Konzepte nicht erfüllt, ist das ein Hinweis darauf, dass die Klassenhierarchie zu Problemen führen kann.
- Wenn dagegen eine „ist ein“-Beziehung besteht, muss das noch lange nicht bedeuten, dass eine Vererbung sinnvoll ist.

Beispiele: 1. Die Aussage „Tübingen ist eine Stadt“ sollte nicht dazu führen, eine Klasse für die Stadt Tübingen von einer Klasse für eine Stadt abzuleiten. Vererbung ist eine Beziehung zwischen Klassen. Eine spezielle Stadt wird besser durch ein Objekt einer Klasse *Stadt* als durch eine eigene Klasse dargestellt. Dass die Definition einer eigenen Klasse für ein spezielles Objekt wie eine Stadt nicht sinnvoll ist, sieht man außerdem daran, dass es in der Realität keine verschiedenen Objekte einer Klasse wie *Tuebingen* gibt.

2. Die Aussage „Jedes Quadrat ist ein Rechteck“ legt diese Klassenhierarchie nahe, für die schon auf Seite 476 gezeigt wurde, dass sie nicht unproblematisch ist:



Diese Beispiele zeigen, dass die unbedachte Übertragung von umgangssprachlichen „ist ein“-Formulierungen leicht zu unpassenden Hierarchien führen kann.

Offensichtlich kann man sich in der Suche nach „der richtigen“ Hierarchie grenzenlos verlieren. Deshalb soll dieser Abschnitt mit einem Rat von Meyer (1997, S. 862) abgeschlossen werden: Das **Ziel einer Klassenhierarchie** ist die **Konstruktion von Software** und **nicht Philosophie**. Selten gibt es nur eine einzige Lösung. Und falls es mehrere gibt, ist es oft nicht einfach, die beste zu finden. Das wichtigste Kriterium ist hier, dass die Klassen ihren Zweck für bestimmte Anwendungen gut erfüllen. Und das kann auch mit Klassen möglich sein, die in einem philosophischen Sinn nicht perfekt sind.

### 8.3.6 OO Design: Komposition und „hat ein“-Beziehungen

Wenn man ein Quadrat zusammen mit einem *C2DPunkt* für seine Position darstellen will, hat man die Wahl zwischen den folgenden beiden Möglichkeiten:

1. Man nimmt in *C2DQuadrat* ein Element des Typs *C2DPunkt* auf (wie in der Klasse *C2DKreis* von Aufgabe 8.2.2):

```
class C2DQuadrat1 {
    C2DPunkt Position;
    double Seitenlaenge;
    // ...
};
```

2. Man leitet die Klasse *C2DQuadrat* von der Klasse *C2DPunkt* ab:

```
class C2DPunkt {
    double x, y;
public:
    double Abstand() { return sqrt(x*x + y*y); }
    // ...
};

class C2DQuadrat2 :public C2DPunkt {
    double Seitenlaenge;
    // ...
};
```

Diese beiden Klassen haben die folgenden Unterschiede und Gemeinsamkeiten:

1. Objekte der beiden Klassen haben **denselben Informationsgehalt**. Die Datenelemente eines Objekts *q1* der Klasse *C2DQuadrat1* unterscheiden sich nur durch ihre Namen von denen eines Objekts *q2* der Klasse *C2DQuadrat2*:

|                 |                 |
|-----------------|-----------------|
| q1.Position.x   | q2.x            |
| q1.Position.y   | q2.y            |
| q1.Seitenlaenge | q2.Seitenlaenge |

- Die beiden Klassen unterscheiden sich durch ihre Schnittstelle, da eine abgeleitete Klasse die Schnittstelle der Basisklasse erbt. Über ein Objekt der Klasse *C2DQuadrat2* kann man auf die Funktion *Abstand* zugreifen:

```
q2.Abstand();
```

Über ein *private* Datenelement wie *Position* hat man dagegen keinen Zugriff auf die Funktion *Abstand*:

```
q1.Position.Abstand(); // Fehler: Kein Zugriff möglich
```

Allerdings kann man kaum sagen, dass in der Realität jedes Quadrat ein Punkt ist. Das würde insbesondere bedeuten, dass jede Elementfunktion eines Punktes (z.B. *Abstand*) auch für ein Quadrat sinnvoll ist (siehe Aufgabe 8.3.7, 2.).

Deshalb besteht zwischen den durch diese Klassen dargestellten Konzepten keine „ist ein“-Beziehung. Nach den Ausführungen des letzten Abschnitts ist dann auch keine Ableitung angemessen.

Stattdessen wird man eher sagen, dass ein Quadrat eine Position **hat**.

Falls eine Klasse D ein Datenelement einer Klasse C enthält, bezeichnet man die Beziehung zwischen den beiden Klassen auch als „**hat ein**“-Beziehung oder als **Komposition**. Eine „hat ein“-Beziehung unterscheidet sich von einer „ist ein“-Beziehung zwischen D und C dadurch, dass

- die Schnittstelle von C über ein Objekt der Klasse D nicht verfügbar ist,
- die Klassen C und D keine „ist ein“-Beziehung darstellen müssen,
- die Klasse D mehr als ein Element der Klasse C enthalten kann.

### 8.3.7 Konversionen zwischen *public* abgeleiteten Klassen

In Abschnitt 8.3.5 wurde gezeigt, dass man ein Objekt einer *public* abgeleiteten Klasse wie ein Objekt einer Basisklasse verwenden kann, wenn in der abgeleiteten Klasse keine Elementfunktion der Basisklasse verdeckt wird. Deshalb sollte man ein Objekt einer *public* abgeleiteten Klasse auch anstelle eines Objekts einer Basisklasse verwenden können. Das ist in C++ tatsächlich möglich:

- Ein **Objekt** einer *public* abgeleiteten Klasse kann man einem Objekt einer Basisklasse zuweisen. Dabei wird das Objekt der abgeleiteten Klasse in das Teilobjekt der Basisklasse konvertiert, das in der abgeleiteten Klasse enthalten ist.
- Einen **Zeiger** auf ein Objekt einer abgeleiteten Klasse kann man einem Zeiger auf ein Objekt einer Basisklasse zuweisen. Der Zeiger auf das Objekt der abgeleiteten Klasse wird dann in einen Zeiger auf das Teilobjekt der Basisklasse konvertiert, das im Objekt der abgeleiteten Klasse enthalten ist.
- Eine **Referenz** auf eine Basisklasse kann mit einem Objekt einer abgeleiteten Klasse initialisiert werden.

- Eine Funktion mit einem **Parameter** eines Basisklassentyps kann mit einem Argument aufgerufen werden, dessen Typ eine abgeleitete Klasse ist. Der Parameter kann dabei ein Wertparameter, ein Zeiger oder eine Referenz sein.

Das sind die einzigen Konversionen, die der Compiler ohne eine benutzerdefinierte zwischen verschiedenen Klassen durchführt. Deshalb werden Klassen in der umgekehrten Reihenfolge (von der Basisklasse zur abgeleiteten Klasse) oder nicht voneinander abgeleitete Klassen nicht ineinander konvertiert.

Beispiele: Hier wird eine *public* von der Klasse *C2DPunkt* abgeleitete Klasse *C3DPunkt* vorausgesetzt. Außerdem sollen diese Variablen definiert sein:

```
C2DPunkt p2(1, 2);
C3DPunkt p3(3, 4, 5);

C2DPunkt* pp2 = new C2DPunkt(1, 2);
C3DPunkt* pp3 = new C3DPunkt(3, 4, 5);
```

1. Dann ist die Zuweisung

```
p2 = p3;
```

möglich. Dabei wird der Wert *p3.z* ignoriert. Die folgende Zuweisung wird dagegen vom Compiler zurückgewiesen:

```
p3 = p2; // Fehler: Konversion nicht möglich
```

2. Auch von den nächsten beiden Zuweisungen ist nur die erste möglich:

```
pp2 = pp3;
pp3 = pp2; // Fehler: Konversion nicht möglich
```

3. Die Funktion *show* kann man nicht nur mit einem Argument des Datentyps *C2DPunkt*, sondern auch mit einem des Typs *C3DPunkt* aufrufen:

```
void show(C2DPunkt p)
{
    cout << p.toStr() << endl;
}

show(p2); // (1,2) mit p2 von oben
show(p3); // (3,4) mit p3 von oben
```

Wie schon in Abschnitt 8.3.3 gezeigt wurde, führt der Aufruf einer nicht virtuellen Elementfunktion immer zum Aufruf der Funktion, die zum Datentyp des Objekts gehört, mit dem sie aufgerufen wird. Deshalb kann man eine nicht virtuelle Funktion aus einer abgeleiteten Klasse nicht über ein Objekt einer Basisklasse aufrufen. Das gilt auch dann, wenn die Funktion aus der Basisklasse in einer abgeleiteten Klasse verdeckt wird und wenn sie über einen Zeiger oder eine Referenz auf ein Objekt der abgeleiteten Klasse aufgerufen wird. In Abschnitt 8.5 wird aber gezeigt, wie genau das mit virtuellen Funktionen möglich ist.

Beispiel: Mit den Zeigern *pp2* und *pp3* aus dem letzten Beispiel erhält man mit den folgenden Anweisungen die jeweils als Kommentar aufgeführte Ausgabe für einen *C2DPunkt*:

```
pp2 = &p3;
pp2->toStr(); // (3,4)
```

Obwohl *pp2* wie *pp3* auf einen *C3DPunkt* zeigt, wird beim Aufruf über *pp2* nicht die Funktion *C3DPunkt::toStr* aufgerufen:

```
pp3->toStr(); // (3,4,5)
```

Auch der Aufruf der Funktion *show* führt unabhängig vom Datentyp des Arguments immer zum Aufruf der Funktion *C2DPunkt::toStr*:

```
show(p2); // (1,2)
show(p3); // (3,4)
```

Von einer Funktion, die wie *show* mit Argumenten verschiedener Klassen aufgerufen werden kann, erwartet man aber normalerweise, dass sie für jedes Argument das richtige Ergebnis hat. Das richtige Ergebnis wäre hier die Ausgabe aller Koordinaten des Arguments, und das würde man durch einen Aufruf der Elementfunktion des Arguments erreichen. Ein solches Ergebnis ist deshalb mit nicht virtuellen Funktionen nicht möglich.

Wenn eine Funktion aus einer Basisklasse in einer abgeleiteten Klasse verdeckt wird, entsteht beim Aufruf der Funktion über einen Zeiger oder eine Referenz auf ein Objekt der Basisklasse eventuell der falsche Eindruck, dass die Funktion aus der abgeleiteten Klasse aufgerufen wird, wenn der Zeiger oder die Referenz auf ein Objekt der abgeleiteten Klasse zeigt.

Beispiel: Da die Funktion *toStr* aus *C3DPunkt* die Funktion der Basisklasse verdeckt, erwartet man eventuell bei den beiden Aufrufen

```
pp2 = &p3;
pp2->toStr(); // (1,2)
show(p3); // (3,4)
```

dass die Funktion *toStr* aus der Klasse *C3DPunkt* aufgerufen wird, da *pp2* und das Argument von *show* auf ein Objekt dieser Klasse zeigen.

Um diesen falschen Eindruck zu verhindern, sollte man **verdeckte Funktionen vermeiden**. Stattdessen sollte man **virtuelle Funktionen** (siehe Abschnitt 8.4.2) verwenden, wenn man eine Funktion aus einer Basisklasse in einer abgeleiteten Klasse mit demselben Namen, aber mit anderen Anweisungen implementieren will.

### Aufgaben 8.3.7

1. Besteht zwischen den Konzepten unter a) bis d) eine „ist ein“- oder eine „hat ein“-Beziehung? Da es oft nicht einfach ist, sich für eine der beiden zu entscheiden, sollen Sie möglichst für beide Sichtweisen Argumente suchen.

- a) Automobil, Motor, Räder
- b) Katze, Hund, Tier
- c) Fahrzeug, Landfahrzeug, Wasserfahrzeug, Automobil, Segelboot
- d) Mitarbeiter, Abteilungsleiter, Sekretärin

2. Wieso gibt es keine implizite Konversion einer Basisklasse in eine abgeleitete Klasse?

### 8.3.8 Mehrfachvererbung und virtuelle Basisklassen

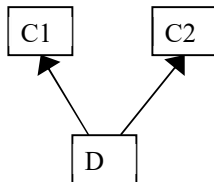
In allen bisherigen Beispielen hatte eine abgeleitete Klasse nur eine einzige direkte Basisklasse. Diese Art der Vererbung wird auch als **Einfachvererbung** (single inheritance) bezeichnet. In C++ ist es aber auch möglich, eine Klasse nicht nur aus einer Basisklasse abzuleiten, sondern aus mehreren:

```
class C1 {
    int a;
};

class C2 {
    int a;
};

class D : public C1, public C2 {
};
```

Diese Art der Vererbung bezeichnet man als **Mehrfachvererbung** (multiple inheritance). Wie in diesem Beispiel gibt man dabei mehrere Basisklassen einschließlich ihrer Zugriffsrechte nach dem „:“ an und trennt sie durch Kommas. In der grafischen Darstellung der Klassenhierarchie zeigen dann zwei oder mehr Pfeile von der abgeleiteten Klasse auf ihre Basisklassen:



Die abgeleitete Klasse enthält wie bei einer Einfachvererbung alle Elemente der Basisklassen. Falls wie in diesem Beispiel mehrere Basisklassen Elemente desselben Namens enthalten, kann es leicht zu Mehrdeutigkeiten kommen. Spricht man z.B. in einer Elementfunktion von D das Element a an, ist ohne weitere Angaben nicht klar, ob es sich um das Element aus C1 oder das aus C2 handelt:

```
class D : public C1, public C2 {
    void f(int i)    // Dazu muss a in den Basisklassen
    {               // public oder protected sein.
        a = i; // error: mehrdeutiger Zugriff von "a": 'C1::a' und
    }              // 'C2::a'
};
```

Solche Mehrdeutigkeiten kann man durch eine Qualifizierung des Elementnamens mit dem Klassennamen auflösen:

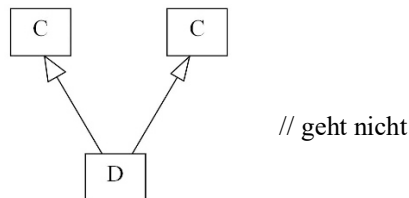
```
class D : public C1, public C2 {
    void f(int i)
    {
        C1::a = i;
        C2::a = i + 1;
    }
};
```

Außerhalb einer Elementfunktion kann man die Elemente wie in der Funktion f ansprechen:

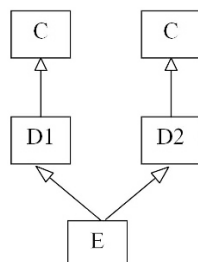
```
void f(D d, D* pd)
{
    d.C1::a = 17;
    pd->C1::a = 17;
}
```

Der Compiler prüft die Eindeutigkeit eines Namens vor den Zugriffsrechten auf diesen Namen. Deshalb kann man Mehrdeutigkeiten nicht dadurch verhindern, dass man die Elemente in der einen Basisklasse als *private* deklariert.

Eine Klasse kann keine mehrfache direkte Basisklasse einer abgeleiteten Klasse sein, da man dann die Elemente der Basisklassen nicht unterscheiden kann:



Als indirekte Basisklasse kann dieselbe Klasse jedoch mehrfach vorkommen:



Hier enthält die Klasse E zwei Basisklassen des Typs C und deshalb alle Elemente von C doppelt. Falls C ein Element a enthält, kann man die beiden von C geerbten Elemente über D1 und D2 unterscheiden:



```
void f(E e, E* pe)
{
    e.D1::a = 17;    // nicht e.D1::C::a
    pe->D2::a = 17;  // nicht pe->D2::C::a
}
```

Manchmal möchte man allerdings nicht, dass ein Objekt einer mehrfach verwendeten Basis-klasse mehr als einmal in einem Objekt der abgeleiteten Klasse enthalten ist. Damit eine Basisklasse von verschiedenen abgeleiteten Klassen gemeinsam benutzt wird, definiert man sie als **virtuelle Basisklasse**.

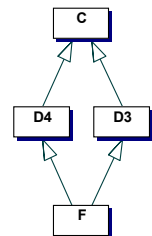
Eine mehrfach verwendete Basisklasse C ist eine virtuelle Basisklasse von F, wenn sie in allen Basisklassen von F als virtuell gekennzeichnet ist. Dazu gibt man vor oder nach dem Zugriffsrecht auf die Klasse das Schlüsselwort **virtual** an:

```
class D3 : virtual public C {
};

class D4 : public virtual C { // umgekehrte Reihenfolge
};

class F : public D3, public D4 {
};
```

Diese Klassenhierarchie wird durch das rechts abgebildete Diagramm dargestellt. Da die Klasse C in dieser Klassenhierarchie nur einmal an die Klasse F vererbt wird, ist das Element a in F eindeutig. Es ist nicht wie oben notwendig, beim Zugriff auf dieses Element anzugeben, von welcher Klasse es geerbt wurde:



```
void f(F f, F* pf)
{
    f.a = 17;    // f.D3::a=17 nicht notwendig
    pf->D4::a = 1; // ebenfalls nicht notwendig, aber möglich
}
```

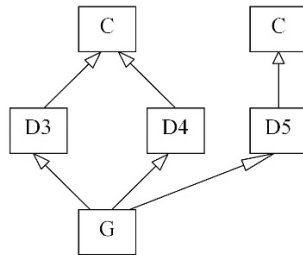
Ein Objekt einer virtuellen Klasse unterscheidet sich nicht von dem einer nicht virtuellen. Der Unterschied zwischen virtuellen und nicht virtuellen Basisklassen kommt erst dann zum Tragen, wenn eine virtuelle Klasse als Basisklasse einer weiteren Klasse verwendet wird.

Eine Klasse kann eine Basisklasse sowohl als virtuelle als auch als nicht virtuelle Basisklasse enthalten. Definiert man zusätzlich zu den Klassen C, D3, D4 und F noch die Klassen

```
class D5 : public C {
};

class G : public D3, public D4, public D5 {
};
```

erhält man das Hierarchiediagramm



Die **Reihenfolge**, in der die Basisklassen bei der Definition einer Klasse angegeben werden, bestimmt die Reihenfolge, in der die Konstruktoren und Destruktoren aufgerufen werden: Die Konstruktoren werden in derselben und die Destruktoren in der umgekehrten Reihenfolge aufgerufen. Dabei werden die Konstruktoren der virtuellen Basisklassen vor den anderen aufgerufen.

Bei der Definition eines Objekts der Klasse G werden die Konstruktoren in der folgenden Reihenfolge aufgerufen:

```

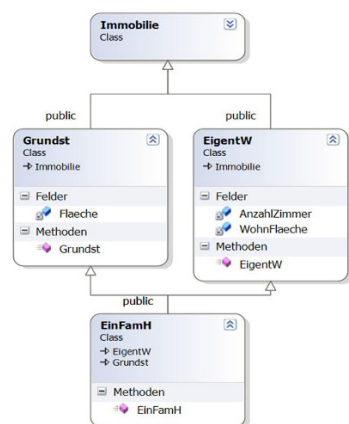
C    // Konstruktor für die virtuelle Basisklasse C
D3
D4
C    // Konstruktor für die nicht virtuelle Basisklasse C
D5
G

```

Bei der einfachen *public* Vererbung wurde darauf hingewiesen (siehe Abschnitt 8.3.5), dass sie einer „ist ein“-Beziehung entspricht. Nach diesem Schema entspricht die mehrfache Vererbung einer „ist sowohl ein ... als auch ein ..“-Beziehung (Booch 1994, S. 124).

Da eine von zwei Klassen C1 und C2 abgeleitete Klasse im Sinne einer „ist ein“-Beziehung sowohl ein C1 als auch ein C2 ist, führt eine Mehrfachvererbung leicht dazu, dass die abgeleitete Klasse kein einziges, in sich geschlossenes Konzept mehr darstellt. Dieses Kriterium war aber in Abschnitt 8.1.7 als eines der wichtigsten dafür genannt worden, dass eine Klasse „gut“ und einfach ist. Andererseits zeigt gerade das letzte Beispiel, dass sie doch nützlich sein kann.

Mehrfache Vererbung war Gegenstand zahlreicher Kontroversen (siehe dazu z.B. Stroustrup, 1994, Abschnitt 12.6). Viele halten sie für zu kompliziert und bezweifeln ihren Nutzen. Stroustrup (1994, Abschnitt 2.1) hält sie für nicht besonders wichtig und insbesondere für wesentlich weniger wichtig als Templates oder das Exception-Handling.



Booch meint (1994, S. 64), dass mehrfache Vererbung oft unnötig verwendet wird. Meyers (1998, Item 43) illustriert das an einem umfangreichen Beispiel, für das zunächst eine Lösung mit einer Mehrfachvererbung naheliegend erscheint. Nach weiteren Überlegungen findet er aber eine wesentlich einfachere Lösung, die nur eine Einfachvererbung verwendet.

In den Programmiersprachen Smalltalk und Object Pascal gibt es keine Mehrfachvererbung. In Java und anderen modernen Programmiersprachen gibt es Mehrfachvererbung nur für sogenannte Interface-Klassen.

### Aufgabe 8.3.8

1. Eine Klasse *Kreis* soll die Funktionen *Flaeche*, *Umfang* und *toStr* haben, und ein *C2DPunkt* die Funktionen *Abstand* und *toStr*. Vergleichen Sie die folgenden Design-Alternativen für eine Klasse, die einen Kreis zusammen mit seiner Position darstellt:
  - a) Die Klasse *C2DKreis* soll durch Mehrfachvererbung von einem *Kreis* und einem *C2DPunkt* abgeleitet werden.
  - b) Die Klasse *C2DKreis* soll einen *Kreis* und einen *C2DPunkt* als Element enthalten.
  - c) Die Klasse *C2DKreis* soll von einem *Kreis* abgeleitet werden und einen *C2DPunkt* als Element enthalten.
  - d) Die Klasse *C2DKreis* soll wie in Aufgabe 8.2.2, 3. den Radius und die Position des Kreises als Element des Typs *C2DPunkt* enthalten.

Definieren Sie die Klassen in a) bis d) mit Konstruktoren, die wie in Aufgabe 8.2.2, 3. aufgerufen werden können. Welche dieser Alternativen ist am besten geeignet, einen Kreis mit seiner Position darzustellen?

## 8.4 Virtuelle Funktionen, späte Bindung und Polymorphie

Ein entscheidender Unterschied zwischen objektorientierten und nicht objektorientierten Sprachen ist die Möglichkeit, Aufrufe von Elementfunktionen nicht schon zum Zeitpunkt der Kompilation aufzulösen, sondern erst während der Laufzeit des Programms. Die dazu verwendete Technik wird als **späte Bindung** bezeichnet. Elementfunktionen, die diese Technik verwenden, heißen in C++ **virtuelle Elementfunktionen**.

### 8.4.1 Der statische und der dynamische Datentyp

Im Zusammenhang mit virtuellen Funktionen ist immer wieder der Begriff **dynamischer Datentyp** nützlich. Dieser unterscheidet sich nur bei einem Zeiger oder einer Referenz auf ein Objekt vom statischen Datentyp. Der dynamische Datentyp ist bei einem Zeiger der Datentyp des Objekts, auf den der Zeiger zeigt. Bei einer Referenz ist er der Datentyp des Objekts, mit dem die Referenz initialisiert wird. Der dynamische Datentyp kann sich während der Laufzeit eines Programms ändern, da einem Zeiger auf eine Basisklasse auch ein Zeiger auf ein Objekt einer abgeleiteten Klasse zugewiesen werden kann. Eine Referenz kann mit einem Objekt einer abgeleiteten Klasse initialisiert werden.

Wenn man explizit zum Ausdruck bringen will, dass man mit dem Begriff „Datentyp“ nicht den dynamischen Datentyp meint, spricht man vom **statischen Datentyp**. Mit dem Begriff „Datentyp“ (ohne das Attribut „dynamisch“) ist meist der statische Datentyp gemeint. Dieser ergibt sich allein aus einer Deklaration und verändert sich während der Laufzeit eines Programms nicht.

Beispiel: Wenn D eine von C abgeleitete Klasse ist, haben die folgenden Objekte den als Kommentar angegebenen statischen Datentyp:

```
C c;    // C
C* pc;  // Zeiger auf C
D d;    // D
D* pd;  // Zeiger auf D
```

Nach der Zuweisung

```
pc = &d;
```

hat pc den dynamischen Datentyp „Zeiger auf D“ und nach

```
pc = &c;
```

„Zeiger auf C“. Der statische Datentyp wird durch keine dieser Zuweisungen verändert.

Bei einem Referenzparameter ist der dynamische Datentyp der Datentyp des Arguments, mit dem die Funktion aufgerufen wird. Dieser ergibt sich erst beim Aufruf der Funktion und nicht schon bei ihrer Definition.

Beispiel: Wenn die Funktion f mit einem Argument aufgerufen wird, dessen Datentyp eine von C abgeleitete Klasse ist, ist der dynamische Datentyp von c in f der des Arguments:

```
void f(const C& c)
{
    // der dynamische Datentyp von c ist der Datentyp
    // des Arguments, mit dem f aufgerufen wird.
}
```

Mit einem *dynamic\_cast* kann man zur Laufzeit feststellen, ob eine Variable x einen bestimmten dynamischen Datentyp T hat:

```
dynamic_cast<T>(x);
```

Das ist aber nur möglich, wenn die Klasse eine virtuelle Funktion enthält. Hier kann x ein Zeiger oder eine Referenz sein. Falls x ein Zeiger ist, gibt *dynamic\_cast* einen booleschen Wert zurück. Bei einer Referenz gibt *dynamic\_cast* den in T konvertierten Wert zurück, falls die Konversion möglich ist. Andernfalls wird eine Exception ausgelöst.

Beispiel: Mit den Klassen

```

struct C {
    virtual void f() {}; // dynamic_cast geht nur mit
                        // polymorphen Klassen

    struct D : public C { };
    struct E : public D { };

```

zeigt die Funktion *fp*, wie man *dynamic\_cast* mit einem Zeiger verwenden kann

```

bool fp(C* p)
{
    D* pd = dynamic_cast<D*>(p);
    if (pd != nullptr)
    { // verwende die Elemente von D
        return true;
    }
    else return false;
}

```

und *fr* mit einer Referenz:

```

bool fr(C& r)
{
    try {
        D& d = dynamic_cast<D&>(r);
        // verwende die Elemente von D
        return true;
    }
    catch (std::bad_cast& ex) { return false; }
}

```

Beim Aufruf erhält man dann die als Kommentar angegebenen Ergebnisse:

```

C* pc = new C(); C* pd = new D(); C* pe = new E();
bool bp[] = { fp(pc), fp(pd), fp(pe)}; // false, true, true
C c; D d; E e;
bool br[] = { fr(c), fr(d), fr(e)}; // false, true, true

```

#### 8.4.2 Virtuelle Funktionen in C++03

Eine mit dem Schlüsselwort ***virtual*** gekennzeichnete Elementfunktion wird als **virtuelle Funktion** bezeichnet. Wenn dann in einer abgeleiteten Klasse eine Funktion

- mit demselben Namen,
- derselben Parameterliste und
- im Wesentlichen demselben Datentyp des Funktionswertes

wie eine virtuelle Funktion einer direkten oder indirekten Basisklasse definiert wird, ist diese **ebenfalls virtuell**. Man sagt dann, dass die Funktion in der abgeleiteten Klasse die der Basisklasse **überschreibt**. Falls die Funktion in der abgeleiteten Klasse nur denselben

Namen, aber eine andere Parameterliste hat, überschreibt sie die Funktion der Basisklasse dagegen nicht, sondern **verdeckt** sie.

Beispiel: Sowohl `C::f` als auch `E::f` sind virtuelle Funktionen, da `E::f` dieselbe Parameterliste wie `C::f` hat. Dagegen ist `D::f` nicht virtuell, da diese Funktion eine andere Parameterliste hat und deshalb `C::f` verdeckt:

```
struct C {
    virtual void f() {};
};

struct D : public C {
    void f(int i) {};
};

struct E : public D {
    void f() {};
};
```

Dieses Beispiel zeigt insbesondere, dass `E::f` die Funktion `C::f` überschreibt, obwohl `D` eine Funktion mit dem Namen `f` enthält, die `C::f` verdeckt.

In einer überschreibenden Funktion ist die Angabe *virtual* zulässig, aber **ohne** jede **Bedeutung**. Deswegen hätte man im letzten Beispiel *virtual* ebenso gut auch bei der Funktion `f` in der Klasse `E` angeben können:

```
struct E : public D {
    virtual void f() {};
};
```

### 8.4.3 Virtuelle Funktionen mit *override* in C++11

In C++03 wird eine virtuelle Funktion durch eine Funktion in einer abgeleiteten Klasse überschrieben, die denselben Namen, denselben Rückgabotyp und dieselbe Parameterliste hat. Ob eine Funktion in einer abgeleiteten Klasse virtuell ist oder nicht, kann man deshalb nur dadurch feststellen, dass man in allen Basisklassen nachschaut, ob es eine virtuelle Funktion mit demselben Namen usw. gibt. Das kann sehr aufwendig sein. Es ist außerdem mit der Gefahr verbunden, dass nach der Änderung einer Parameterliste in einer Basisklasse eine ursprünglich virtuelle Funktion nicht mehr virtuell ist. Dass der Compiler eine Warnung ausgibt, wenn eine Funktion aus einer Basisklasse verdeckt wird, ist nur eine kleine Hilfe.

Diese Probleme lassen sich seit C++11 mit der Angabe *override* nach der Parameterliste einer Funktion vermeiden. Falls diese Funktion keine virtuelle Funktion einer Basisklasse überschreibt (z.B. weil es keine virtuelle Funktion mit demselben Namen, demselben Rückgabotyp und derselben Parameterliste gibt), erzeugt der Compiler eine Fehlermeldung.

Bei einer Funktion mit der Angabe *override* kann auch noch *virtual* angegeben werden. Diese zusätzliche Angabe hat aber keine Auswirkungen.

Beispiel: Die Beispiele aus dem letzten Abschnitt mit *override*:

```

struct C {
    virtual void f() {};
};

struct D : public C {
    void f(int i) {};
};

struct E : public D {
    virtual void f() override {};
};

```

Hier kann man bei E::f *virtual* auch weglassen.

```

struct E : public D {
    void f() override {};
};

```

Würde man hier D so

```

struct D : public C {
    virtual void f(int i) override {};
    virtual void h() override {}
};

```

definieren, würde der Compiler mit einer Fehlermeldung wie „Eine mit "override" deklarierte Memberfunktion überschreibt keinen Basisklassenmember“ darauf hinweisen, dass es keine Basisklasse gibt, von der f und h die Elementfunktionen überschreiben kann. Ohne die Angabe *override* in D würden alle Funktionen akzeptiert.

Bei einer Codeanalyse mit den C++ Core Guidelines (siehe Abschnitt 2.13) wird darauf hingewiesen, *override* zu verwenden:

```

class C {
public:
    virtual void f() {}
};

class D :public C
{
public:
    void f() {} // warning C26433 : Die Funktion " D::f" muss mit
};              // "override" markiert werden(c.128).

```

*override* ist wie auch *final* ein sogenanntes kontextsensitives Schlüsselwort. Diese Kategorie von Schlüsselworten ist neu in C++11. Sie haben ihre Bedeutung nur in einem bestimmten Kontext. So hat *override* die Auswirkung, eine virtuelle Funktion zu überschreiben, nur, wenn es in einem Funktionskopf angegeben wird. In einem anderen Kontext kann es beliebig verwendet werden, z.B. als Name einer Variablen.

Beispiel: Hier werden *override* und *final* als Namen verwendet:

```
void kontextsensitiv()
{
    int override, final;
    override++;
    final++;
}
```

Virtuelle Funktionen werden vererbt. Deshalb ist eine virtuelle Funktion aus einer Basisklasse, die in einer abgeleiteten Klasse nicht überschrieben wird, auch eine virtuelle Funktion der abgeleiteten Klasse.

Beispiel: In der Klassenhierarchie im letzten Beispiel ist auch `C::f` eine virtuelle Funktion von `D`, da `C::f` in `D` nicht überschrieben wird.

Der Aufruf einer **virtuellen Funktion** über einen Zeiger oder eine Referenz führt immer zum Aufruf der Funktion, die zum **dynamischen Datentyp** des Zeigers oder der Referenz gehört. Das ist der wesentliche Unterschied zu einer **nicht virtuellen Funktion**, die immer über den **statischen Datentyp** des verwendeten Objekts aufgerufen wird.

Beispiel: Mit den Klassen aus dem letzten Beispiel werden nach den folgenden Zuweisungen die jeweils als Kommentar angegebenen Funktionen aufgerufen:

```
C* pc = new C; // stat. DT von pc: Zeiger auf C

pc->f(); // C::f
pc = new E; // dyn. Datentyp von pc: Zeiger auf E
pc->f(); // E::f
C c;
pc = &c; // dyn. Datentyp von pc: Zeiger auf C
pc->f(); // C::f
```

Wäre die Funktion `f` hier nicht virtuell, würde immer die Funktion `C::f` aufgerufen, da `pc` den statischen Datentyp „Zeiger auf `C`“ hat.

Da die Funktion `f` in `D` nicht überschrieben wird, ist die letzte überschreibende Funktion von `f` in der Klasse `D` die Funktion `C::f`. Der folgende Aufruf führt deshalb zum Aufruf von `C::f`:

```
D d;
pc = &d; // dyn. Datentyp von pc: Zeiger auf D
pc->f(); // C::f
```

Die so aufgerufene Funktion wird auch als „**letzte überschreibende Funktion**“ bezeichnet:

- Falls die aufgerufene Funktion im dynamischen Datentyp definiert wird, ist diese Funktion die letzte überschreibende Funktion.



- Andernfalls muss die aufgerufene Funktion in einer Basisklasse definiert sein. Dann ist die letzte überschreibende Funktion die erste Funktion, die man ausgehend vom dynamischen Datentyp in der nächsten Basisklasse findet.

Wenn eine virtuelle Funktion nicht über einen Zeiger oder eine Referenz, sondern über ein „gewöhnliches“ **Objekt** aufgerufen wird, führt das zum **Aufruf** der Funktion, die zum statischen Datentyp gehört.

Beispiel: Die Objekte *c* und *e* sind weder Zeiger noch Referenzen. Deshalb wird immer die Funktion aufgerufen, die zum statischen Typ gehört:

```
E e;
C c = e; // statischer Datentyp von c: C
c.f(); // C::f(&c)
```

Dasselbe Ergebnis würde man auch beim Aufruf über einen Zeiger oder eine Referenz erhalten, wenn *f* nicht virtuell wäre.

Da die beim Aufruf einer virtuellen Funktion aufgerufene Funktion immer vom aktuellen Objekt abhängt, können nur Funktionen virtuell sein, die in Verbindung mit einem Objekt aufgerufen werden müssen. Das sind gerade die nicht statischen **Elementfunktionen**. Gewöhnliche (globale) Funktionen, statische Elementfunktionen oder *friend*-Funktionen können nicht virtuell sein.

Der Aufruf einer virtuellen Funktion über einen Zeiger oder eine Referenz unterscheidet sich also grundlegend von dem einer nicht virtuellen Funktion:

- Der Aufruf einer nicht virtuellen Funktion wird bereits bei der Kompilation in den Aufruf der Funktion übersetzt, die sich aus dem Datentyp des entsprechenden Objekts ergibt. Da diese Zuordnung bereits bei der Kompilation stattfindet, wird sie auch als **frühe Bindung** bezeichnet.
- Im Unterschied dazu ergibt sich diese Zuordnung beim Aufruf einer virtuellen Funktion nicht schon bei der Kompilation, sondern erst während der Laufzeit. Deshalb bezeichnet man diese Zuordnung auch als **späte Bindung**.

Da sich der dynamische Datentyp eines Objekts während der Laufzeit eines Programms ändern kann, kann derselbe Funktionsaufruf zum Aufruf von verschiedenen Funktionen führen. Dieses Verhalten virtueller Funktionen wird auch als **Polymorphie** („viele Formen“) bezeichnet.

Im Unterschied zu nicht virtuellen Funktionen kann man also beim Aufruf einer virtuellen Funktion dem Quelltext nicht entnehmen, welche Funktion tatsächlich aufgerufen wird. Um die damit verbundene Gefahr von Unklarheiten zu vermeiden, muss der Name aller der Funktionen, die eine virtuelle Funktion überschreiben, für alle Funktionen zutreffend sein. Deshalb sollte eine Funktion nur durch solche Funktionen überschrieben werden, die dieselben Aufgaben haben, und für die deshalb auch derselbe Name angemessen ist. Siehe Abschnitt 8.4.7 und 8.4.9.

Der **typische Einsatzbereich** von virtuellen Funktionen ist eine Klassenhierarchie, in der die verschiedenen Klassen Funktionen mit derselben Aufgabe und derselben Schnittstelle haben,

wobei die Aufgabe in jeder Klasse durch unterschiedliche Anweisungen gelöst wird. Definiert man dann jede dieser Funktionen mit den für die jeweilige Klasse richtigen Anweisungen virtuell, wird beim Aufruf einer solchen Funktion über einen Zeiger oder eine Referenz automatisch **immer „die richtige“ Funktion** aufgerufen.

Seit C++17 gibt es mit ***std::variant*** eine Alternative, Polymorphie ohne virtuelle Funktionen zu implementieren (siehe Abschnitt 11.4.5).

In der folgenden Klassenhierarchie haben die beiden Klassen *C2DPunkt* und *C3DPunkt* eine solche Funktion *toStr*. Diese hat in beiden Klassen dieselbe Aufgabe, einen Punkt durch einen String darzustellen. Wegen der unterschiedlichen Anzahl von Koordinaten sind dafür aber in den beiden Klassen verschiedene Anweisungen notwendig:

```
class C2DPunkt {
    double x, y;
public:
    C2DPunkt(double x_ = 0, double y_ = 0) :x(x_), y(y_) {}

    double X() const { return x; }
    double Y() const { return y; }

    virtual string toStr() const
    {
        return "(" + std::to_string(x) + "|" + std::to_string(y) + ")";
    } // z.B. (2,345|3,45678)

    void anzeigen() const
    {
        cout << toStr() << endl;
    }
};

class C3DPunkt :public C2DPunkt {
    double z;
public:
    C3DPunkt(double x_ = 0, double y_ = 0, double z_ = 0) :C2DPunkt(x_,
                                                                    y_), z(z_) {}

    double Z() const { return z; }

    string toStr() const override
    {
        return "(" + std::to_string(X()) + "|"
                +std::to_string(Y())+"|"+std::to_string(z)+"");
    } // z.B. (2,345|3,45678)
```

```

void anzeigen() const
{
    cout << toStr() << endl;
}
};

```

Diese Klassen unterscheiden sich von denen in Abschnitt 8.3.4 nur durch die Worte „virtual“ und „override“. Diese kleine Änderung hat zur Folge, dass bei den folgenden Beispielen immer automatisch „die richtige“ Funktion aufgerufen wird:

1. In einem Container (z.B. einem Array oder einem Vektor) mit Zeigern auf Objekte einer Basisklasse kann man auch **Zeiger auf Objekte** einer abgeleiteten Klasse ablegen:

```

const int n = 2;
C2DPunkt*a[n] = { new C2DPunkt(1,2), new C3DPunkt(1,2,3) };

```

Obwohl die Elemente des Containers auf Objekte verschiedener Klassen zeigen, kann man alle in einer einzigen Schleife bearbeiten:

```

for (int i = 0; i < n; ++i)
    cout << a[i]->toStr() << endl;

```

Da hier eine virtuelle Funktion aufgerufen wird, erhält man die Ausgabe:

```

(1|2)
(1|2|3)

```

2. In einer Funktion ist der dynamische Datentyp eines **Referenzparameters** der Datentyp des Arguments, mit dem die Funktion aufgerufen wird. Der Aufruf einer virtuellen Funktion des Parameters führt so zum Aufruf der entsprechenden Funktion des Arguments. Deshalb wird beim Aufruf der Funktion

```

void show(const C2DPunkt& p) // Der dynamische
{ // Datentyp von p ist der Datentyp des Arguments.
    cout << p.toStr() << endl;
}

```

die Elementfunktion *toStr* des Arguments aufgerufen. Mit den folgenden Anweisungen erhält man so dieselbe Ausgabe wie im letzten Beispiel:

```

C2DPunkt p2(1, 2);
C3DPunkt p3(1, 2, 3);
show(p2); // ruft C2DPunkt::toStr auf
show(p3); // ruft C3DPunkt::toStr auf

```

Da der Parameter *p* in *show* als konstanter Referenzparameter übergeben wird, muss die mit *p* aufgerufene Funktion *const* sein (siehe Abschnitt 8.2.13).

Wäre die Funktion *toStr* hier nicht virtuell, würde sie auch beim Aufruf mit einem Zeiger auf eine abgeleitete Klasse die Werte zur Basisklasse ausgeben:

```
C2DPunkt* pp2 = new C3DPunkt(1, 2, 3);  
pp2->toStr();// nicht virtuell: Aufruf von C2DPunkt::toStr
```

Das war gerade das Beispiel aus Abschnitt 8.3.7. Mit der virtuellen Funktion *toStr* erhält man also die richtigen Werte. Deshalb kann die Hierarchie der Klassen *C2DPunkt* usw. mit der virtuellen Funktion *toStr* sinnvoll sein, obwohl in Abschnitt 8.3.5 festgestellt wurde, dass sie nicht unbedingt eine „ist ein“-Beziehung darstellt. In Abschnitt 8.4.9 werden wir eine weitere Hierarchie betrachten, bei der dann zwischen den Klassen eine „ist ein“-Beziehung besteht.

Polymorphie ermöglicht also, in einer Klassenhierarchie erst zur Laufzeit zu entscheiden, welche Funktion aufgerufen wird, und schon während der Kompilation.

Offensichtlich ist die Polymorphie von virtuellen Funktionen eine der wichtigsten Eigenschaften objektorientierter Programmiersprachen. Deshalb ist in vielen anderen objektorientierten Sprachen (z.B. Java) späte Bindung die **Voreinstellung** für alle Elementfunktionen. Auch die Unified Modelling Language (UML) geht davon aus, dass alle Funktionen mit derselben Signatur in einer Klassenhierarchie normalerweise polymorph sind. Meyer (1997, S. 513-515) kritisiert heftig, dass in C++ frühe Bindung die Voreinstellung ist und dass man späte Bindung nur mit der zusätzlichen Angabe *virtual* erhält. Da sich ein Programmierer oft darauf verlässt, dass die Voreinstellungen einer Sprache richtig sind, entsteht der Eindruck, dass späte Bindung etwas Spezielles ist. Mit früher Bindung ist aber die Gefahr von Fehlern wie bei der Funktion *toStr* verbunden. Er empfiehlt deshalb, alle Elementfunktionen virtuell zu definieren, falls es nicht einen expliziten Grund gibt, der dagegenspricht.

Für den Einsatz von virtuellen Funktionen müssen die folgenden **Voraussetzungen** erfüllt sein:

1. Die Funktionen müssen **Elementfunktionen einer Klassenhierarchie** sein. Ohne Vererbung ist auch keine Polymorphie möglich. Falls eine virtuelle Funktion in einer abgeleiteten Klasse nicht überschrieben wird, unterscheidet sich ihr Aufruf nicht von dem einer nicht virtuellen Funktion.
2. Die virtuellen Funktionen müssen **dieselbe Schnittstelle** haben.
3. Der Aufruf der virtuellen Funktionen muss **über Zeiger oder Referenzen** erfolgen. Deshalb werden Objekte oft über Zeiger angesprochen, obwohl ansonsten kein Grund dazu besteht.
4. Sowohl die Klassenhierarchie als auch die virtuellen Funktionen müssen gefunden werden. Dafür ist meist ein umfassenderes Verständnis des Problems und eine **gründlichere Problemanalyse** notwendig als für eine Lösung, die diese Techniken nicht verwendet. Eine falsche oder unpassende Hierarchie kann die Lösung eines Problems aber behindern.

Die Ausführungen über objektorientierte Analyse und objektorientiertes Design haben gezeigt, dass weder die Klassen noch ihre Hierarchien vom Himmel fallen. Allerdings wird in den nächsten Abschnitten gezeigt, wie man solche Hierarchien oft systematisch konstruieren kann.

Der direkte Aufruf einer virtuellen Funktion führt nur dann zum Aufruf der letzten überschreibenden Funktion, wenn dieser Aufruf über einen Zeiger oder eine Referenz erfolgt. Beim **Aufruf** einer virtuellen Funktion **in einer Elementfunktion** derselben Klasse wird die zugehörige letzte überschreibende Funktion aber auch dann aufgerufen, wenn die Elementfunktion über ein Objekt aufgerufen wird, das kein Zeiger oder keine Referenz ist. Der Grund dafür ist, dass der Aufruf einer Elementfunktion immer über den *this*-Zeiger erfolgt (siehe Abschnitt 8.1.4), und deshalb jeder Aufruf einer Elementfunktion immer ein Aufruf über einen Zeiger ist.

Beispiel: Die Funktion *g* der Klasse *C*

```
struct C {
    void g() { f(); };
    virtual void f() {};
} c;

E e;
```

wird vom Compiler folgendermaßen übersetzt:

```
void g(C* this)
{
    this->f();
};
```

Beim Aufruf einer solchen Funktion wird dann der Zeiger auf das aktuelle Objekt als Argument für den *this*-Parameter übergeben:

```
c.g(); // C::f(&c)
e.g(); // E::f(&e)
```

Obwohl *f* hier jedes Mal über ein Objekt (und nicht über einen Zeiger oder eine Referenz) aufgerufen wird, ruft diese beim ersten Aufruf eine andere Funktion auf als beim zweiten Aufruf.

Ergänzt man die Klasse *C2DPunkt* um eine nicht virtuelle Funktion *anzeigen*, die die virtuelle Funktion *toStr* der Klassenhierarchie aufruft

```
void C2DPunkt::anzeigen() // nicht virtuell
{
    cout << toStr() << endl;
};
```

führt der Aufruf von *anzeigen* dann zum Aufruf der Funktion *toStr*, die zum dynamischen Datentyp des *this*-Zeigers gehört. Das ist gerade der Datentyp des Objekts, mit dem *anzeigen* aufgerufen wird:

```
C2DPunkt p2(1, 2);
C3DPunkt p3(1, 2, 3);
p2.anzeigen(); // ruft p2->toStr() auf
p3.anzeigen(); // ruft p3->toStr() auf
```

Auf diese Weise kann man virtuelle Funktionen auch über „gewöhnliche“ Variablen aufrufen, ohne dass dafür Zeiger oder Referenzen notwendig sind.

Virtuelle Funktionen können auch in *final* Klassen definiert werden, obwohl es dann keine Möglichkeit gibt, sie in einer abgeleiteten Klasse zu überschreiben.

Die Angabe *final* ist nicht nur bei einer Klasse (siehe Abschnitt 8.3.2), sondern auch bei einer virtuellen Funktion möglich. Dann kann diese Funktion in einer abgeleiteten Klasse nicht überschrieben werden.

Beispiel: Die Funktion *f* kann in einer abgeleiteten Klasse nicht überschrieben werden:

```
class Basisklasse {
public:
    virtual void f() final {};
};
```

### Aufgabe 8.4.3

1. Welche Funktionen der Klasse *D* werden kompiliert:

```
class C
{
    virtual void f0();
    virtual void f1() const;
    virtual void f2(int n = 0);
    virtual int f3(int);
    void f4();
    virtual void f5(const int n);
    virtual void f6(const int& n);
    virtual C& f7();
};

class D : public C
{
    virtual override void f0() ;
    virtual void f1() override;
    void f2() override;
    int f3(int = 0) override;
    void f4() override;
    void f5(int n) override;
    void f6(int& n) override;
    D& f7() override;
};
```

2. Überarbeiten Sie die Klassen *CIDPunkt*, *C2DPunkt* und *C3DPunkt* der Lösung von Aufgabe 8.3.4, 2. so, dass die in jeder Klasse definierte Funktion *toStr* virtuell ist.

a) Rufen Sie *toStr* nacheinander über einen einzigen Zeiger auf ein Objekt der Basisklasse auf, der nacheinander auf ein Objekt der Klassen *CIDPunkt*, *C2DPunkt*

und *C3DPunkt* zeigt. Verfolgen Sie im Debugger (schrittweise Ausführung mit *F11*), welche der Funktionen *toStr* dabei aufgerufen werden.

- b) Schreiben Sie eine Funktion *show*, die mit Argumenten der Typen *C1DPunkt*, *C2DPunkt* und *C3DPunkt* aufgerufen werden kann und jeweils den Rückgabewert der Elementfunktion *toStr* ausgibt.
- c) Ergänzen Sie die Klasse *C1DPunkt* (aber nicht die Klassen *C2DPunkt* und *C3DPunkt*) um eine nicht virtuelle Elementfunktion *anzeigen*, die *toStr()* ausgibt. Rufen Sie *anzeigen* mit Objekten der Typen *C1DPunkt*, *C2DPunkt* und *C3DPunkt* auf.
- d) Erweitern Sie diese Klassen um Funktionen, die die Länge eines Punktes (d.h. seinen Abstand vom Nullpunkt) zurückgeben:
  - bei *C1DPunkt*: Absolutbetrag von *x*
  - bei *C2DPunkt*:  $\sqrt{x*x + y*y}$ ;
  - bei *C3DPunkt*:  $\sqrt{x*x + y*y + z*z}$

3. Ein Programm soll eine Klassenhierarchie wie

```
class C {
public:
    virtual string f(int x)
    {
        return "C::f";
    }
};

class D :public C
{
public:
    virtual string f(int x)
    {
        return "D::f";
    }
};
```

enthalten. Nach einiger Zeit stellt man dann fest, dass man die Parameterübergabe in *f* optimieren kann, wenn man die Parameterliste von

```
f(int x)
```

zu

```
f(const int& x)
```

ändert. Da die Quelltexte von *C* und *D* in verschiedenen Dateien enthalten sind, wird aber vergessen, die Parameterliste von *f* in *D* entsprechend abzuändern.

- a) Wie wirkt sich diese Änderung auf den Aufruf der Funktion

```
void test()
{
    C* pc = new D();
    cout << pc->f(1) << endl;
}
```

aus?

- b) Wie kann man solche unbeabsichtigten Effekte vermeiden?

#### 8.4.4 Die Implementierung von virtuellen Funktionen: *vptr* und *vtbl*

Betrachten wir noch zwei Beispiele zur **letzten überschreibenden Funktion**:

Beispiel: Die Klassen C, D und E unterscheiden sich von denen in dem Beispiel von Abschnitt 8.3.3 nur dadurch, dass alle Funktionen außer C::f3 virtuell sind:

```
struct C {
    virtual void f1() {};
    virtual void f2() {};
    void f3() {}; // nicht virtuell
};

struct D : public C {
    void f1() override {};
    virtual void f3() {};
};

struct E : public D {
    void f1() override {};
};
```

Dann stellen die folgenden Tabellen die über ein Objekt des jeweiligen dynamischen Datentyps aufgerufenen virtuellen Funktionen dar.

- a) Nach der nächsten Definition hat *pc* den statischen Datentyp „Zeiger auf C“. Der dynamische Datentyp ändert sich mit jeder der folgenden Zuweisungen:

```
C* pc = new C; //dynamischer Datentyp: Zeiger auf C
pc = new D;   //dynamischer Datentyp: Zeiger auf D
pc = new E;   //dynamischer Datentyp: Zeiger auf E
```

Ein Aufruf der virtuellen Funktionen

```
pc->f1();
pc->f2();
```

führt dann in Abhängigkeit vom dynamischen Datentyp von *pc* zum Aufruf der in der Tabelle angegebenen Funktion:



|    | C     |
|----|-------|
| f1 | C::f1 |
| f2 | C::f2 |

|    | D     |
|----|-------|
| f1 | D::f1 |
| f2 | C::f2 |

|    | E     |
|----|-------|
| f1 | E::f1 |
| f2 | C::f2 |

Der Aufruf von `f3` führt dagegen immer zum Aufruf von `C::f3`, da `f3` keine virtuelle Funktion ist und der Aufruf solcher Funktionen immer über den statischen Datentyp aufgelöst wird.

- b) Nach der nächsten Definition hat `pd` den statischen Datentyp „Zeiger auf D“ und den jeweils als Kommentar angegebenen dynamischen Datentyp.

```
D* pd = new D; //dynamischer Datentyp: Zeiger auf D
pd = new E;    //dynamischer Datentyp: Zeiger auf E
```

Der Aufruf von

```
pd->f1();
pd->f2();
pd->f3();
```

führt dann zum Aufruf der in der Tabelle angegebenen Funktion:

|    | D     |
|----|-------|
| f1 | D::f1 |
| f2 | C::f2 |
| f3 | D::f3 |

|    | E     |
|----|-------|
| f1 | E::f1 |
| f2 | C::f2 |
| f3 | D::f3 |

Im Unterschied zu a) wird hier auch der Aufruf von `f3` über den dynamischen Datentyp aufgelöst, da `f3` in D eine virtuelle Funktion ist.

Diese Tabellen enthalten die letzte überschreibende Funktion zum jeweiligen dynamischen Datentyp. Sie entsprechen im Wesentlichen den Tabellen in Abschnitt 8.3.3, mit denen die Bedeutung eines Namens in einer Klassenhierarchie gezeigt wurde. Diese ergab sich aus dem statischen Datentyp.

Für viele Anwendungen von virtuellen Funktionen sind die Ausführungen im letzten Abschnitt ausreichend. Gelegentlich ist es aber doch hilfreich, wenn man sich vorstellen kann, wie diese intern realisiert werden. Da diese interne Realisierung im C++-Standard nicht festgelegt ist, muss kein Compiler so vorgehen, wie das anschließend beschrieben wird. Allerdings gehen viele, wenn nicht sogar alle Compiler nach diesem Schema vor.

**Späte Bindung** kann folgendermaßen realisiert werden:

1. Für jede Klasse mit virtuellen Funktionen legt der Compiler eine **Tabelle** mit den Adressen **der virtuellen Funktionen** (die *virtual function table* oder **vtbl**) an. Diese Tabellen können nach diesem einfachen Schema konstruiert werden:
  - Für eine Basisklasse werden die Adressen der virtuellen Funktionen eingetragen.
  - Für eine abgeleitete Klasse wird zuerst die Tabelle der direkten Basisklasse kopiert. Dann werden die Adressen der entsprechenden virtuellen Funktionen in dieser Tabelle

überschrieben. Außerdem wird die Tabelle um die in der abgeleiteten Klasse definierten virtuellen Funktion ergänzt.

Beispiel: Für die Klassen C, D und E aus dem letzten Beispiel

```
struct C {
    virtual void f1() {};
    virtual void f2() {};
    void f3() {}; // nicht virtuell
};

struct D : public C {
    void f1() override {};
    virtual void f3() {};
};

struct E : public D {
    void f1() override {};
};
```

erhält man so folgenden Tabellen:

|    | C     |
|----|-------|
| f1 | C::f1 |
| f2 | C::f2 |

|    | D     |
|----|-------|
| f1 | D::f1 |
| f2 | C::f2 |
| f3 | D::f3 |

|    | E     |
|----|-------|
| f1 | E::f1 |
| f2 | C::f2 |
| f3 | D::f3 |

Das sind aber gerade die Tabellen, in den im Beispiel des letzten Abschnitts die aufgerufenen Funktionen dargestellt wurden.

2. In jedem Objekt einer Klasse mit virtuellen Funktionen legt der Compiler einen Zeiger auf die *vtbl* seiner Klasse an. Dieser Zeiger wird auch als *vp<sub>tr</sub>* (*virtual table pointer*) bezeichnet.

Beispiel: Ein Objekt einer Klasse mit virtuellen Funktionen unterscheidet sich von dem einer Klasse ohne virtuelle Funktionen um die zusätzliche Adresse für den *vp<sub>tr</sub>*. Deshalb ist ein Objekt der Klasse C2 um die für einen Zeiger notwendigen Bytes größer als eines von C1:

```
class C1 { // sizeof(C1)=4 (bei 32-bit Windows)
    void f() {};
    int i;
};

class C2 { // sizeof(C2)=8 (bei 32-bit Windows)
    virtual void f() {};
    int i;
};
```

Da ein Konstruktor die Aufgabe hat, alle Datenelemente eines Objekts zu initialisieren, erzeugt der Compiler für jeden Konstruktor Anweisungen, die den *vp<sub>tr</sub>* mit der Adresse

seiner *vtbl* initialisieren. Diese Initialisierung ist einer der wesentlichen Unterschiede zwischen einem Konstruktor und einer Funktion.

3. Wenn der Aufruf einer virtuellen Funktion über einen Zeiger oder eine Referenz erfolgt, wird er in einen Aufruf der entsprechenden Funktion aus der *vtbl* übersetzt, auf die der *vptr* im aktuellen Objekt zeigt.

Beispiel: Die *vtbl* ist ein Array von Funktionszeigern. Bezeichnet man den *vptr* mit seiner Adresse als *vptr* und den zu einer virtuellen Funktion *f* gehörenden Index mit *i*, wird der Aufruf *p->f()* vom Compiler folgendermaßen behandelt:

```
vptr[i](p); // p ist das Argument für this
```

Eine virtuelle Funktion gehört also über den *vptr* zu einem Objekt. Man kann das auch so sehen, dass **ein Objekt seine virtuellen Funktionen „enthält“**.

Der **indirekte Funktionsaufruf** ist der wesentliche Unterschied zwischen dem Aufruf einer virtuellen und dem einer nicht virtuellen Funktion. Über diesen wird die späte Bindung eines Funktionsaufrufs an die aufgerufene Funktion realisiert.

Durch die indirekte Sprungtechnik sind virtuelle Elementfunktionen etwas langsamer als nicht virtuelle. Außerdem werden virtuelle Funktionen **nicht inline** expandiert. Der Laufzeitunterschied zwischen einer virtuellen und einer nicht virtuellen Funktion dürfte aber bei den meisten Programmen nicht ins Gewicht fallen. Die folgenden Zeiten wurden mit den Funktionen in der ersten Spalte gemessen. Sie zeigen, dass der zusätzliche Zeitaufwand für den indirekten Aufruf bei virtuellen Funktionen im Nanosekundenbereich liegt und kaum spürbar ist:

| Benchmarks Visual Studio 2019.5, Release, x64, /O2 Laufzeit in Millisekunden |                    |                          |                  |
|------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------|------------------|
| 10 000 000 Aufrufe                                                           | virtuelle Funktion | nicht virtuelle Funktion | globale Funktion |
| int fi(int x) {return x+17;;};                                               | 17 ms              | 17 ms                    | 17 ms            |
| double fd(double x) {return x+17;;};                                         | 65 ms              | 65 ms                    | 65 ms            |
| double fx(double x) {return sin(x+17);};                                     | 110 ms             | 100 ms                   | 100 ms           |

Im Zusammenhang mit virtuellen Funktionen zeigt sich insbesondere, wie wichtig es ist, dass jedes Objekt durch den Aufruf eines Konstruktors initialisiert wird. Nur so ist gewährleistet, dass jede virtuelle Funktion über einen initialisierten *vptr* aufgerufen wird. Deshalb wird in C++ auch so genau darauf geachtet, dass **jedes Objekt durch den Aufruf eines Konstruktors initialisiert wird**. Das gilt sowohl für ein eigenständiges Objekt als auch für ein Teilobjekt, das als Datenelement oder als Basisklasse in einem Objekt enthalten ist:

- Mit einem Elementinitialisierer kann ein Teilobjekt mit einem seiner Konstruktoren initialisiert werden.
- Gibt man bei der Definition eines Objekts keine Argumente für einen Konstruktor an, wird es immer mit seinem Standardkonstruktor initialisiert.

**Polymorphie** ist **nur über Zeiger** möglich. Das ist nicht nur in C++ so. Da ein Objekt d einer abgeleiteten Klasse D mehr Elemente als ein Objekt c einer Basisklasse C haben kann, können bei einer Zuweisung

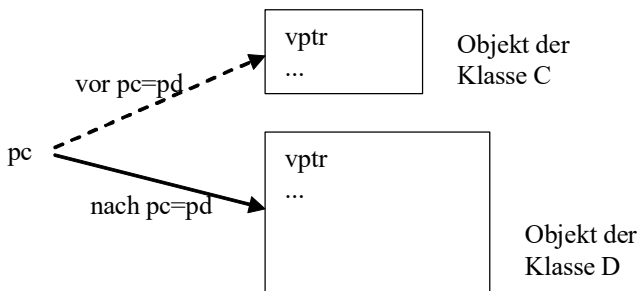
```
c = d;
```

nicht alle Elemente von d nach c kopiert werden. Wenn der Aufruf einer virtuellen Funktion von C nach einer solchen Zuweisung zum Aufruf einer überschreibenden Funktion aus der abgeleiteten Klasse D führen würde, könnte diese Funktion auf Elemente ihrer Klasse D zugreifen, die es in C überhaupt nicht gibt.

Bei der Zuweisung von Zeigern besteht dieses Problem nicht: Wenn pc und pd Zeiger auf Objekte der Klassen C und D sind, werden bei der Zuweisung

```
pc = pd;
```

nur die Zeiger kopiert. Diese sind aber immer gleich groß (4 Bytes bei einem 32-Bit-System) und können einander deshalb problemlos zugewiesen werden. Beim Aufruf einer Funktion über die vtbl der Klasse werden dann immer nur Elemente der aktuellen Klasse angesprochen:



Deswegen übersetzt ein C++-Compiler den Aufruf einer virtuellen Funktionen nur beim Aufruf über einen Zeiger in einen Aufruf der letzten überschreibenden Funktion. Beim Aufruf über ein Objekt ruft er dagegen die Funktion auf, die zum statischen Datentyp des Objekts gehört.

In manchen Programmiersprachen (z.B. in Java, wo man überhaupt keine Zeiger definieren kann) führt der Aufruf einer virtuellen Funktion immer zum Aufruf der Funktion, die zum dynamischen Datentyp gehört. Das wird intern dadurch realisiert, dass alle Objekte Zeiger sind, ohne dass sie explizit als Zeiger definiert werden müssen. Dieser „Trick“, der auch als **Referenzsemantik** bezeichnet wird, macht den Umgang mit virtuellen Funktionen einfacher und erspart die Unterscheidung von Funktionsaufrufen über Zeiger und Objekte.

Allerdings hat die Referenzsemantik auch ihren Preis. Wenn alle Objekte Zeiger sind, führt eine Zuweisung von Objekten zu einer Kopie der Zeiger und nicht zu einer Kopie der Objekte.

Beispiel: In einer Programmiersprache mit Referenzsemantik sollen c und d Objekte derselben Klasse sein und ein Datenelement x haben. Dann zeigen c und d nach

einer Zuweisung auf dasselbe Objekt, und eine Veränderung eines Elements des einen Objekts führt auch zu einer Veränderung dieses Elements des anderen Objekts:

```
c.x = 0;
c = d; // Zuweisung
d.x = 1;
// c.x=1, obwohl c.x nicht verändert wurde
```

Wenn man in einer solchen Programmiersprache die Objekte und nicht nur die Zeiger kopieren will, muss man dafür Funktionen schreiben, die meist das tun, was in C++ der vom Compiler erzeugte Zuweisungsoperator macht. Diese Funktionen werden in Java oder C# nicht automatisch erzeugt.

Nachdem nun der Begriff „**überschreiben**“ vorgestellt wurde und dieser gelegentlich mit den Begriffen „**verdecken**“ und „**überladen**“ verwechselt wird, sollen die Unterschiede dieser drei Begriffe kurz hervorgehoben werden: Alle drei Begriffe sind durch Funktionen mit einem gemeinsamen Namen gekennzeichnet.

- „**Überschreiben**“ wird nur im Zusammenhang mit virtuellen Funktionen in einer Klassenhierarchie verwendet, die dieselbe Parameterliste und im Wesentlichen denselben Rückgabetyt haben. Die aufgerufene Funktion ergibt sich aus dem dynamischen Datentyp eines Zeigers oder einer Referenz.
- „**Verdeckte Funktionen**“ sind nicht virtuelle Funktionen in einer Klassenhierarchie und sollten vermieden werden.
- „**Überladene Funktionen**“ sind unabhängig von einer Klassenhierarchie und werden über unterschiedliche Parameter unterschieden.

#### Aufgabe 8.4.4

1. Die Klassen *C1DPunkt* usw. sollen wie in 8.3.4, 2. definiert sein. Sie sollen alle um eine Funktion *setze* erweitert werden, die einen Punkt an die als Argument übergebene Position setzen, wie z.B.:

```
void C1DPunkt::setze(C1DPunkt Ziel);
void C2DPunkt::setze(C2DPunkt Ziel);
```

Kann man diese Funktionen virtuell definieren und so erreichen, dass immer die richtige Funktion zu einem Objekt aufgerufen wird?

### 8.4.5 Virtuelle Konstruktoren und Destruktoren

Im C++-Standard ist ausdrücklich festgelegt, dass ein **Konstruktor nicht virtuell** sein kann. Das ergibt sich einfach schon daraus, dass ein Konstruktor den exakten Typ des Objekts kennen muss, das er konstruiert (siehe auch Stroustrup, 1997, Abschnitt 15.6.2). Da ein Konstruktor außerdem anders als gewöhnliche Funktionen mit der Speicherverwaltung zusammenarbeitet, gibt es auch keine Zeiger auf einen Konstruktor. In manchen anderen Programmiersprachen (z.B. Object Pascal und Smalltalk) gibt es dagegen virtuelle Konstruktoren.

Allerdings kann man in C++ **virtuelle Konstruktoren** leicht **simulieren**. Stroustrup (1997, Abschnitt 15.6.2) verwendet dazu virtuelle Funktionen, die ein Objekt mit einem Konstruktor erzeugen und als Funktionswert zurückgeben:

```
class C {
public:
    C() {}
    C(const C&) {}
    virtual C* make_new() { return new C(); }
    virtual C* clone() { return new C(*this); }
};

class D : public C {
public:
    D() {}
    D(const D&) {}
    D* make_new() override { return new D(); }
    D* clone() override { return new D(*this); }
};

void f(C* pc)
{
    C* pn = pc->make_new();
    C* c = pc->clone();
}
```

Hier entspricht *make\_new* einem virtuellen Standardkonstruktor und *clone* einem virtuellen Kopierkonstruktor. Obwohl die Datentypen der Funktionswerte nicht gleich sind, überschreiben diese Funktionen in der abgeleiteten Klasse die der Basisklasse, da sie kovariant sind. Deshalb entscheidet bei ihrem Aufruf wie in der Funktion *f* der dynamische Datentyp des Arguments darüber, welchen Datentyp das konstruierte Objekt hat.

Im Unterschied zu einem Konstruktor kann ein **Destruktor virtuell** sein. Da vor seinem Aufruf immer ein Konstruktor aufgerufen wurde, kann ein vollständig initialisiertes Objekt vorausgesetzt werden.

Obwohl ein Destruktor nicht vererbt wird und obwohl er in der abgeleiteten Klasse einen anderen Namen als in der Basisklasse hat, überschreibt ein Destruktor in einer abgeleiteten Klasse den virtuellen Destruktor einer Basisklasse. Ein virtueller Destruktor in der

Basisklasse hat zur Folge, dass die Destruktoren in allen abgeleiteten Klassen ebenfalls virtuell sind.

Wie das folgende Beispiel zeigt, sind virtuelle Destruktoren oft notwendig:

```
class C {
    int* pi;
public:
    C() { pi = new(int); }
    ~C() { delete pi; }
};

class D : public C {
    double* pd;
public:
    D() { pd = new(double); }
    ~D() { delete pd; }
};

void test()
{
    C* pc = new D;
    delete pc;
}
```

Da der Destruktor hier eine nicht virtuelle Funktion ist, wird in *test* durch „delete pc“ der Destruktor aufgerufen, der sich aus dem statischen Datentyp von pc ergibt, und das ist der Destruktor von C. Deshalb wird der für \*pd reservierte Speicherplatz nicht freigegeben, obwohl das durch die Definition des Destruktors von D wohl gerade beabsichtigt war.

Dieses Problem lässt sich mit einem virtuellen Destruktor in der Basisklasse lösen. Wie bei jeder anderen virtuellen Funktion wird dann der zum dynamischen Datentyp gehörende Destruktor aufgerufen. Falls dieser Datentyp eine abgeleitete Klasse ist, werden auch noch die Destruktoren aller Basisklassen aufgerufen:

```
class C {
    int* pi;
public:
    C() { pi = new(int); }
    virtual ~C() { delete pi; }
};
```

Der **Destruktor** einer Klasse sollte **immer dann virtuell** sein, wenn

1. von dieser Klasse weitere Klassen abgeleitet werden, die einen explizit definierten Destruktor benötigen, und
2. für einen Zeiger auf ein Objekt dieser Klasse *delete* aufgerufen wird.

Es gibt aber viele Klassen, für die 1. und 2. nicht zutreffen. Dann sollte man sie als *final* kennzeichnen. Eine *final* Klasse benötigt **keinen virtuellen Destruktor**.

Da man bei einer Klasse, die nicht mit *final* gekennzeichnet ist, nie ausschließen kann, dass sie später wie unter 1. und 2. verwendet wird, sollte man alle Destruktoren von solchen Klassen virtuell definieren. Der Preis für einen unnötig virtuellen Destruktor ist nur der zusätzliche Speicherplatz für den *vptr* und der etwas größere Zeitaufwand für den indirekten Funktionsaufruf.

Bei einer Codeanalyse mit den C++ Core Guidelines (siehe Abschnitt 2.13) wird darauf hingewiesen, dass eine Klasse mit einer virtuellen Funktion einen virtuellen Destruktor benötigt:

```
class VirtuellerDestruktorNotwendig
{ // warning C26436: Ein class Typ mit einer virtuellen Funktion
    benötigt entweder einen public virtual oder
    virtual void f() {}; // protected non-virtual Destruktor (c.35).
};
```

Bei einer solchen Analyse wird auch darauf hingewiesen, *final*, *virtual* und *override* nicht zu kombinieren:

```
class VirtuellerDestruktorNotwendig_mit_final_1
{ // warning C26435:
    virtual void f() final {}; // Die Funktion "f" muss genau
}; // einen Wert aus virtual, override oder final angeben (c.128).
```

In diesem Zusammenhang ist es bemerkenswert, dass **alle Containerklassen** der Standardbibliothek (*string*, *vector*, *list*, *map* usw.) **nichtvirtuelle Destruktoren** haben. Deshalb sollte man von diesen Klassen nie Klassen ableiten, die einen Destruktor benötigen.

#### 8.4.6 Virtuelle Funktionen in Konstruktoren und Destruktoren

Bei der Initialisierung eines Objekts einer abgeleiteten Klasse wird nacheinander für jede Basisklasse (in der Reihenfolge der Klassenhierarchie) ein Konstruktor aufgerufen, der das entsprechende Teilobjekt initialisiert. Da jeder Konstruktor zuerst die *vtbl* seiner Klasse in den *vptr* des Objekts einträgt und danach die Anweisungen des Konstruktors ausführt, führt der Aufruf einer virtuellen Funktion in einem Konstruktor zum Aufruf der Funktion aus der zuletzt eingetragenen *vtbl*. Das ist aber gerade die Funktion der aktuellen Klasse, die auch aufgerufen werden würde, wenn die Funktion nicht virtuell wäre. Insbesondere wird nicht die virtuelle Funktion des abgeleiteten Objekts aufgerufen, das letztendlich initialisiert wird.

Kurz: Aufrufe von virtuellen Funktionen in einem Konstruktor werden immer wie Aufrufe von nicht virtuellen Funktionen nach ihrem **statischen Datentyp** aufgelöst.

Beispiel: Der Aufruf von *f* im Konstruktor von *D* führt zum Aufruf von *C::f*:

```
struct C {
    C() { f(); }
```



```

    virtual void f()
    {
        cout << "C" << endl;
    }
};

struct D : public C {
    D() :C() { } // Aufruf von C::f und nicht D::f
    void f() override
    {
        cout << "D" << endl;
    }
};

D* pd = new D;

```

Dasselbe gilt auch für den Aufruf einer virtuellen Funktion in einem **Destruktor**. Hier ist der Grund allerdings nicht der, dass der *vptr* noch nicht die Adresse der richtigen *vtbl* enthält. Dieser enthält immer noch die Adresse der richtigen *vtbl*, so dass immer die richtige virtuelle Funktion aufgerufen wird. Da die Destruktoren aber in der umgekehrten Reihenfolge der Konstruktoren aufgerufen werden, verwendet diese Funktion eventuell Speicherbereiche, die durch den Destruktor einer abgeleiteten Klasse bereits wieder freigegeben wurden. Damit ein solcher Zugriff auf nicht reservierte Speicherbereiche nicht stattfinden kann, wird der Aufruf einer virtuellen Funktion in einem Destruktor ebenfalls nach dem statischen Datentyp aufgelöst.

Da sich der Aufruf von virtuellen Funktionen in Konstruktoren und Destruktoren von dem in anderen Funktionen grundlegend unterscheidet, wird oft empfohlen, **solche Aufrufe zu vermeiden**.

#### 8.4.7 OO-Design: Einsatzbereich und Test von virtuellen Funktionen

Vergleichen wir nun den **Einsatzbereich** von virtuellen und nicht virtuellen Funktionen.

Eine **virtuelle Funktion** kann in einer abgeleiteten Klasse durch eine Funktion mit demselben Namen und derselben Parameterliste überschrieben werden. Da der Name einer Funktion ihre Aufgabe beschreiben soll, kann man so **dieselbe Aufgabe in verschiedenen Klassen einer Hierarchie mit unterschiedlichen Funktionen** lösen. Beim Aufruf über einen Zeiger oder eine Referenz auf ein Objekt einer Basisklasse wird dann die Funktion aufgerufen, die zum dynamischen Datentyp gehört.

Beispiel: In den beiden Klassen dieser Hierarchie wird die Fläche durch unterschiedliche Anweisungen bestimmt. Diese Aufgabe kann mit virtuellen Funktionen gelöst werden, weil beide dieselbe Parameterliste haben:

```

class Quadrat {
protected:
    double a;
public:
    Quadrat(double a_) :a(a_) {};

```

```

    virtual double Flaeche() { return a*a; };
};

class Rechteck :public Quadrat {
    double b;
public:
    Rechteck(double a_, double b_) : Quadrat(a_), b(b_) {}
    double Flaeche() override { return a*b; };
};

```

Obwohl manche Anhänger der reinen objektorientierten Lehre empfehlen, immer nur virtuelle Funktionen zu verwenden, gibt es Fälle, in denen sie **nicht notwendig** sind:

- falls eine Funktion in allen abgeleiteten Klassen das richtige Ergebnis liefert und deswegen in keiner abgeleiteten Klasse überschrieben werden muss.
- falls von einer Klasse nie eine Klasse abgeleitet wird. Solche Klassen gibt es recht oft.

In diesen Fällen kann man zwar genauso gut auch eine virtuelle Funktion verwenden, da der Programmablauf derselbe ist wie bei einer nicht virtuellen Funktion. Eine nicht virtuelle Funktion hat aber den Vorteil, dass ihr Aufruf ein wenig schneller ist und kein Speicherplatz für den *vptr* benötigt wird (obwohl das kaum ins Gewicht fällt).

Beispiele: 1. In dieser Klassenhierarchie liefert die Funktion *Flaeche* auch in der abgeleiteten Klasse richtige Ergebnisse.

```

class Rechteck {
    double a, b;
public:
    Rechteck(double a_, double b_) :a(a_), b(b_) {};
    double Flaeche() { return a*b; };
};

class Quadrat : public Rechteck {
public:
    Quadrat(double a_) :Rechteck(a_, a_) {}
};

```

2. Die Container-Klassen der Standardbibliothek (*string*, *vector*, *list*, *map* usw.) sind nicht dafür konstruiert, als Basisklassen verwendet zu werden (siehe Abschnitt 8.4.5). Deshalb können alle ihre Elementfunktionen auch nicht virtuell sein.

Da der Aufruf einer **virtuellen Funktion** zum Aufruf verschiedener Funktionen führen kann, muss man auch beim **Testen** alle diese Funktionen berücksichtigen. Um eine virtuelle Funktion zu testen, muss man sie mit Objekten aller Klassen aufrufen, in denen sie definiert ist.

Beispiel: Die virtuellen Funktionen *f* der Klassen *C* und *D* sind ganz bestimmt kein gutes Beispiel für virtuelle Funktionen, da sie nicht dieselbe Aufgabe lösen. Sie sollen nur zeigen, wie zwei Tests aussehen können.

```

struct C {
    virtual int f(int x)
    {
        if (x < 0) return -x; else return x;
    }
};

struct D :public C {
    int f(int x) override
    {
        if (x < 17) return x; else return 17;
    }
};

```

Die Testfälle für C::f werden dann über einen dynamischen Typ C aufgerufen und die für D::f über einen dynamischen Typ D.

```

C* p = new C;
// teste p->f mit Argumenten, die zu einer
// Pfadüberdeckung für C::f führen:
p->f(-1);
p->f(0);
p = new D;
// teste p->f mit Argumenten, die zu einer
// Pfadüberdeckung für D::f führen:
p->f(16);
p->f(17);

```

#### 8.4.8 OO-Design und Erweiterbarkeit

Da man mit virtuellen Funktionen dieselbe Aufgabe in verschiedenen Klassen einer Hierarchie mit verschiedenen Funktionen lösen kann, bieten solche Funktionen oft die Möglichkeit, die Funktionalität eines Programms auf einfache Art zu erweitern.

Beispiel: In einem Zeichenprogramm für zwei- und dreidimensionale Punkte sollen die Punkte in einem Container (z.B. ein Array oder ein Vektor) verwaltet und durch eine Funktion wie *zeigePunkte* angezeigt werden.

```

class Zeichnung {
    int n; // Anzahl der Punkte
    C2DPunkt* a[Max];
public:
    void zeigePunkte()
    {
        for (int i = 0; i<n; ++i)
            cout << a[i].toStr() << endl;
    }
}

```

Angeichts des enormen Markterfolgs dieses Zeichenprogramms hat die Marketingabteilung beschlossen, dass Sie es auf vierdimensionale Punkte erweitern sollen.

Für eine solche Erweiterung muss nur eine Klasse für die vierdimensionalen Punkte von der Klasse *C3DPunkt* abgeleitet und mit einer virtuellen Funktion *toStr* ausgestattet werden. Dann können in den Container a Objekte dieser Klasse abgelegt und mit der bisherigen Version der Funktion *zeigePunkte* angezeigt werden. Dafür ist keine Änderung dieser Funktion notwendig.

**Ohne Vererbung und virtuelle Funktionen** wäre der Aufwand für eine solche Erweiterung beträchtlich größer. Betrachten wir dazu als Beispiel eine nicht objektorientierte Variante des Zeichenprogramms.

Beispiel: In der Programmiersprache C würde man die Funktionen z.B. mit einer Struktur mit einem **Typfeld** und einer *union* implementieren. Die *union* enthält dann einen der vorgesehenen Datentypen, und das Typfeld gibt an, welcher Datentyp das ist. In der Ausgabefunktion kann man dann über das Typfeld entscheiden, welcher Fall vorliegt.

```
struct S2DPunkt {
    double x, y;
};

struct S3DPunkt {
    double x, y, z;
};

enum TTypfeld { P2D, P3D };
struct SPunkt {
    TTypfeld Typfeld;
    union {
        S2DPunkt p2;
        S3DPunkt p3;
    };
};

string toStr(SPunkt p)
{
    switch (p.Typfeld) {
    case P2D: return
        "(" + std::to_string(p.p2.x) + "|" +
            std::to_string(p.p2.y)+"");
        break;
```

```

case P3D: return
    "(" + std::to_string(p.p3.x) + "|" +
        std::to_string(p.p3.y) + "|" +
        std::to_string(p.p3.z) + ")";
    break;
default: return "Fehler";
}
};

```

Um diese Version der Funktion *toStr* auf vierdimensionale Punkte zu erweitern, ist eine Änderung dieser Funktion notwendig.

In diesem einfachen Beispielprogramm ist eine solche Änderung ziemlich unproblematisch. Im Rahmen eines großen Projekts kann eine solche Erweiterung aber recht aufwendig werden. Außerdem bringt jeder Eingriff in ein Programm immer die Gefahr mit sich, dass Programmteile, die bisher funktioniert haben, anschließend nicht mehr funktionieren. Dazu kann ein recht umfangreicher und kostspieliger Test kommen.

Bei der objektorientierten Version ist dagegen keine Änderung des bisherigen Programms notwendig. Eine solche Erweiterung der Funktionalität eines Programms erreicht man durch dieses Programmdesign:

- Die zusätzliche Funktionalität wird in einer abgeleiteten Klasse mit virtueller Funktion implementiert.
- Diese Funktionen werden über einen Zeiger oder eine Referenz auf ein Objekt der Basisklasse aufgerufen. Dann wird beim Aufruf einer virtuellen Funktion immer die Funktion aufgerufen, die zum Objekt gehört.

Dazu muss die abgeleitete Klasse bei der Kompilation der Funktionsaufrufe über die Basisklasse noch nicht einmal bekannt sein. Die Klassendefinitionen in einer Header-Datei und die Object-Datei mit den kompilierten Elementfunktionen reichen dafür aus. Deshalb kann der Entwickler einem Anwender eine Klassenbibliothek in Form einer Object-Datei und der Header zur Verfügung stellen, ohne den Quelltext der Elementfunktionen preisgeben zu müssen.

Offensichtlich ist es ein **großer Vorteil**, wenn man ein Programm **erweitern** kann, **ohne** dass man den **Quelltext ändern** muss. Dadurch ist sichergestellt, dass seine bisherige Funktionalität nicht beeinträchtigt wird. Das systematische Design mit diesem Ziel wird auch als **design for extensibility** bezeichnet und kann ein wichtiger Beitrag zur **Qualitätssicherung** sein. Deshalb entwirft man Klassenhierarchien oft so, dass eine Erweiterung einfach nur dadurch möglich ist, dass man neue Klassen in die Hierarchie einhängt.

Das ist eine neue Sicht beim Design einer **Klassenhierarchie**:

- Bisher waren die Klassen aus der Problemstellung vorgegeben. Die Konstruktion einer Klassenhierarchie bestand vor allem aus der Suche nach einer Anordnung dieser vorgegebenen Klassen in einer Hierarchie.
- Bei der Konstruktion einer Klassenhierarchie mit dem Ziel der Erweiterbarkeit wird sie dagegen systematisch konstruiert: **Jede Funktion, die eventuell später einmal in einer**

**speziellere Klasse dieselbe Aufgabe mit anderen Anweisungen lösen soll, ist ein Kandidat für eine virtuelle Funktion.** Alle Klassen, die eine solche Funktion haben, werden dann von einer gemeinsamen Basisklasse abgeleitet.

Dabei müssen die spezielleren Klassen bei der Konstruktion der Hierarchie überhaupt noch nicht bekannt sein. Oft kann man aber vorhersehen, in welcher Richtung spätere Erweiterungen eines Programms möglich sind. Dann sollte man beim Design einer Klassenhierarchie solche potenziellen Erweiterungen berücksichtigen.

Die systematische Konstruktion von Klassen liegt oft auch bei Konzepten nahe, die verschieden sind, aber trotzdem Gemeinsamkeiten haben. Dann fasst man die Gemeinsamkeiten in einer Basisklasse zusammen, die nur den Zweck hat, diese Gemeinsamkeiten zusammenzufassen. Die Klassen, um die es eigentlich geht, sind dann Erweiterungen dieser Klassen. Gleichartige Operationen mit unterschiedlichen Anweisungen werden dann durch virtuelle Funktionen implementiert.

**Wiederverwendbarkeit, Erweiterbarkeit und Qualitätssicherung** sind Schlüsselbegriffe für eine erfolgreiche Softwareentwicklung. Diese Ziele werden durch die Techniken der objektorientierten Programmierung unterstützt. Die dafür notwendigen Klassenhierarchien erhält man allerdings nicht mehr allein aus der Analyse der Problemstellung. Vielmehr muss man sie systematisch konstruieren.

Die Abschnitte 0 und 8.4.4 haben gezeigt, dass es nicht einfach ist, den Begriff „virtual“ in einem einzigen Satz zu beschreiben. Bjarne Stroustrup (der Entwickler von C++) hat die Frage, wieso virtuelle Funktionen eigentlich „virtuell“ heißen, gelegentlich so beantwortet: „well, **virtual means magic**“ („virtuell bedeutet Zauberei“, Stroustrup 1994, Abschnitt 12.4.1). Angesichts der Möglichkeit, eine Funktion ohne Änderung ihres Quelltextes zu erweitern, ist dieser Satz nicht einmal so falsch.

#### 8.4.9 Rein virtuelle Funktionen und abstrakte Basisklassen

Eine einheitliche Schnittstelle findet man oft auch bei Klassen, die keine inhaltlichen Gemeinsamkeiten haben und die nicht von einer gemeinsamen Basisklasse abgeleitet sind. Betrachten wir als Beispiel eine Tierhandlung, die Tiere und Autos besitzt und diese in den folgenden Klassen darstellt:

```
class Tier {
    double Lebendgewicht;
    double PreisProKG;
public:
    Tier(double LGewicht_, double PreisProKG_) :
        Lebendgewicht(LGewicht_), PreisProKG(PreisProKG_) {}
    double Wert() { return Lebendgewicht*PreisProKG; }
    string toStr(){ return "Wert: "+std::to_string(Wert()); }
};

class Auto {
    int Sitzplaetze;
    double Wiederverkaufswert;
```

```

public:
    Auto(int Sitzpl_, double WVK_) : Sitzplaetze(Sitzpl_),
        Wiederverkaufswert(WVK_) {}
    double Wert() { return Wiederverkaufswert; }
    string toStr(){ return "Wert: "+std::to_string(Wert()); }
};

```

Wenn diese beiden Klassen eine gemeinsame Basisklasse hätten, könnte man Funktionen für die Basisklasse definieren und diese Funktionen auch mit den abgeleiteten Klassen aufrufen. In diesen Funktionen könnte man dann die virtuellen Funktionen *toStr* und *Wert* verwenden.

Allerdings ist es auf den ersten Blick nicht unbedingt naheliegend, wie eine solche Basisklasse aussehen soll: Für welche Klasse C kann man schon sagen, dass sowohl ein *Auto* als auch ein *Tier* ein C ist? Außerdem besitzen diese Klassen keine gemeinsamen Datenelemente. Deshalb kann auch die Basisklasse keine Datenelemente enthalten. Und wenn die Basisklasse keine Datenelemente enthält – was sollen dann ihre Elementfunktionen machen?

Die Lösung ist so einfach, dass sie oft gar nicht so leicht gefunden wird: Die Elementfunktionen der Basisklasse sollen am besten nichts machen. Wenn eine Basisklasse nur den Zweck hat, eine gemeinsamen Basisklasse für die abgeleiteten Klassen zu sein, braucht sie auch nichts zu machen: Man wird die Funktion *Wert* auch nie für diese **Basisklasse** aufrufen wollen. Deshalb ist die Klasse

```

class Basisklasse {
public:
    virtual ~Basisklasse() {};
    virtual double Wert() {};
    virtual string toStr() {};
};

```

als gemeinsame Basisklasse völlig ausreichend:

```

class Tier : public Basisklasse {
    // Rest wie oben, aber noch mit override
};

class Auto : public Basisklasse {
    // Rest wie oben, aber noch mit override
};

```

Bemerkenswert an der Elementfunktion der Basisklasse ist ihr leerer Anweisungsteil. In der nicht objektorientierten Programmierung sind solche Funktionen meist völlig sinnlos, da ihr Aufruf nur eine etwas umständliche Art ist, nichts zu machen. In der objektorientierten Programmierung können sie sinnvoll sein: Der Sinn besteht einzig und allein darin, in einer abgeleiteten Klasse überschrieben zu werden.

Von einer solchen Basisklasse wird man nie ein Objekt anlegen. Außerdem ist es immer ein Fehler, eine solche leere Funktion aufzurufen. Wenn das trotzdem geschieht, hat man vergessen, sie in einer abgeleiteten Klasse zu überschreiben. Deshalb wäre es naheliegend,

beim Aufruf einer solchen Funktion eine Fehlermeldung ausgeben. Allerdings würde der Fehler dann erst zur Laufzeit entdeckt.

Damit derartige Fehler schon bei der Kompilation erkannt werden können, kann man eine solche Funktion mit dem *pure-specifier* „=0“ als **rein virtuelle Funktion** kennzeichnen:

```
pure-specifier:
    = 0
```

Für eine rein virtuelle Funktion ist keine Definition notwendig, so dass die „leeren“ Funktionsdefinitionen von oben überflüssig sind:

```
class Basisklasse {
public:
    virtual ~Basisklasse() {};
    virtual double Wert() = 0;
    virtual string toStr() = 0;
};
```

Eine Klasse, die mindestens eine rein virtuelle Funktion enthält, wird als **abstrakte Klasse** bezeichnet. Von einer abstrakten Klasse können keine Objekte definiert werden. Auf diese Weise wird durch den Compiler sichergestellt, dass eine rein virtuelle Funktion nicht aufgerufen wird. Es ist aber möglich, einen Zeiger auf eine abstrakte Basisklasse zu definieren.

Beispiel: Mit der Basisklasse von oben ist nur die zweite Definition möglich:

```
Basisklasse x; // error: Instanz von abstrakter
               // Klasse kann nicht erstellt werden
Basisklasse* px; // das geht
```

Eine abstrakte Klasse kann nur als Basisklasse verwendet werden. Wenn in einer Klasse, die von einer abstrakten Klasse abgeleitet wird, nicht alle rein virtuellen Funktionen überschrieben werden, ist die abgeleitete Klasse ebenfalls abstrakt.

Abstrakte Klassen stellen **Abstraktionen** dar, bei denen ein Oberbegriff nur eingeführt wird, um Gemeinsamkeiten der abgeleiteten Klassen hervorzuheben. Solche Abstraktionen findet man auch in umgangssprachlichen Begriffen wie „Wirbeltier“ oder „Säugetier“. Auch von diesen gibt es keine Objekte, die nicht zu einer abgeleiteten Klasse gehören.

Die Funktion *Wert* wurde in den beiden Klassen von oben durch jeweils unterschiedliche Anweisungen realisiert. Deshalb kann sie in der Basisklasse nur als rein virtuelle Funktion definiert werden. Bei der Funktion *toStr* ist das anders: Sie besteht in beiden Klassen aus denselben Anweisungen und kann deshalb auch schon in der Basisklasse definiert werden:

```
class Basisklasse {
public:
    virtual ~Basisklasse() {};
    virtual double Wert() = 0;
```



```
string toStr() { return "Wert: " + std::to_string(Wert()); }  
};
```

Dieses Beispiel zeigt, dass eine rein virtuelle Funktion auch schon in einer Basisklasse aufgerufen werden kann. Der Aufruf der Funktion *toStr* führt dann zum Aufruf der Funktion *Wert*, die zu dem Objekt gehört, mit dem *toStr* aufgerufen wird.

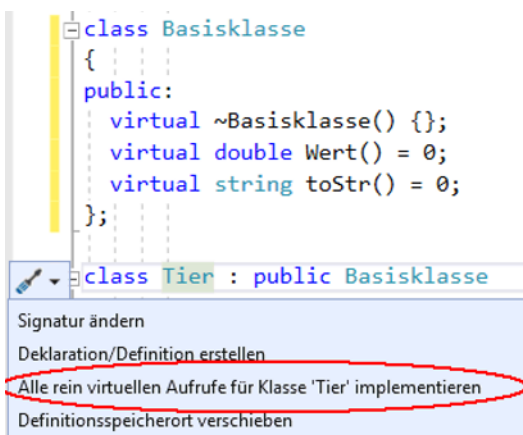
Damit kann eine Funktion in einer Basisklasse ein einheitliches Verhalten in verschiedenen abgeleiteten Klassen definieren, wobei erst in den abgeleiteten Klassen festgelegt wird, was die aufgerufenen Funktionen im Einzelnen machen.

Meyer (1997, S. 504) bezeichnet eine abstrakte Basisklasse, in der rein virtuelle Funktionen aufgerufen werden, auch als **Verhaltensklasse** („behavior class“), da sie das Verhalten von abgeleiteten Klassen beschreibt. Andere Autoren (z.B. Meyers, S. 150) sprechen von **Protokollklassen**. Solche Klassen haben oft keine Konstruktoren, keine Datenelemente und nur rein virtuelle Funktionen sowie einen virtuellen Destruktor.

Falls eine größere Anzahl von Klassen nach diesem Schema aufgebaut ist, um gemeinsam die Architektur einer Anwendung oder eines Programmbausteins zu definieren, spricht man auch von einem **Programmerüst**. Solche Programmerüste realisieren oft komplette Anwendungen, deren Verhalten der Anwender im Einzelnen dadurch anpassen kann, dass er die richtige Funktion überschreibt. Das ist meist wesentlich einfacher als die komplette Anwendung zu schreiben.

Selbstverständlich ist der Name *Basisklasse* für eine solche Basisklasse normalerweise nicht angemessen. Der Name einer Klasse sollte immer die realen Konzepte beschreiben, die die Klasse darstellt. Da eine Basisklasse eine Verallgemeinerung der abgeleiteten Klassen sein soll, sollte dieser Name so allgemein sein, dass für jede abgeleitete Klasse eine „ist-ein“-Beziehung besteht. Denkbar wären hier Namen wie *Buchung* oder *Wirtschaftsgut*.

Fährt man mit dem Mauszeiger bei einer Klassendefinition über den Namen der Klasse oder Basisklasse, bietet Visual Studio unter „Schnellaktionen ...“ die Möglichkeit an, alle rein virtuellen Funktionen für eine Klasse zu implementieren:



Visual Studio erzeugt dann diese Funktionen:

```
class Tier : public Basisklasse
{
    // Geerbt über Basisklasse
    virtual double Wert() override;
    virtual string toStr() override;
};
```

Wenn für den **Destruktor** einer Basisklasse keinerlei Anweisungen sinnvoll sind, aber aus den in Abschnitt 8.4.5 aufgeführten Gründen ein virtueller Destruktor notwendig ist, liegt es nahe, diesen als **rein virtuell** zu definieren. Dadurch erhält man allerdings beim Linken die Fehlermeldung, dass der Destruktor nicht definiert wurde („Unresolved external ...“), da der Destruktor einer Basisklasse immer automatisch vom Destruktor einer abgeleiteten Klasse aufgerufen wird. Diese Fehlermeldung muss man mit einem Anweisungsteil unterbinden, der auch leer sein kann, oder „=default“:

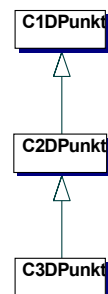
```
class C {
public:
    virtual ~C() {};
    // oder
    virtual ~C() = default;
};
```

#### 8.4.10 OO-Design: Virtuelle Funktionen und abstrakte Basisklassen

Oft benötigt man in verschiedenen Klassen einer Hierarchie verschiedene Funktionen, die alle dieselbe Aufgaben, aber verschiedene Parameterlisten haben. Das ist dann mit den folgenden Problemen verbunden:

- Wegen der verschiedenen Parameterlisten können diese Funktionen nicht eine virtuelle Funktion der Basisklasse überschreiben.
- Würde man sie nicht virtuell definieren, würden sie sich gegenseitig verdecken, was auch nicht wünschenswert ist (siehe Abschnitt 8.3.7).
- Wenn man allen diesen Funktionen verschiedene Namen gibt, würde das Prinzip verletzt, dass der Name ihre Bedeutung beschreibt. Außerdem könnte eine Funktion der Basisklasse über ein Objekt einer abgeleiteten Klasse aufgerufen werden.

Beispiel: Für die praktische Arbeit mit den Klassen der rechts abgebildeten Hierarchie ist meist eine Funktion notwendig, die einen Punkt dieser Klassen an eine bestimmte Position setzt. Da diese Funktion (z.B. mit dem Namen *setze*) in allen diesen Klassen einen anderen Parametertyp hat (einen *C1DPunkt* in der Klasse *C1DPunkt*, einen *C2DPunkt* in *C2DPunkt* usw.), sind mit ihr die oben dargestellten Probleme verbunden (siehe auch Aufgabe 8.4.4). Unterschiedliche Namen (wie z.B. *setze1*, *setze2* usw.) wären auch keine Lösung, da der Aufruf von *setze1* auch über einen *C3DPunkt* möglich ist.

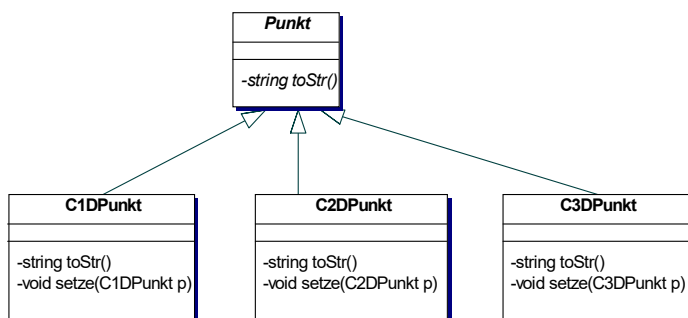


Solche Probleme treten oft bei Hierarchien auf, die keine „ist ein“-Beziehungen darstellen, aber leicht damit verwechselt werden. Coplien (1992, S. 227) bezeichnet solche Beziehungen als „**ist ähnlich wie ein**“-Beziehungen (is-like-a relationship). Man erkennt sie oft an Elementfunktionen, die in allen Klassen der Hierarchie dieselbe Aufgabe haben, aber in jeder Klasse eine andere Parameterliste. Er empfiehlt, die Hierarchie durch eine andere zu ersetzen, bei der eine „ist ein“-Beziehung besteht.

Dass diese Hierarchie keine „ist ein“-Beziehung darstellt, haben wir schon in Abschnitt 8.3.5 festgestellt, da sich ein dreidimensionaler Punkt kaum als zweidimensionaler Punkt interpretieren lässt. Trotzdem konnten wir von dieser Hierarchie in Abschnitt 8.4.2 profitieren, da sie die Möglichkeit bietet, einen Punkt einer abgeleiteten Klasse anstelle eines Punkts der Basisklasse zu verwenden und die **virtuelle Funktion** *toStr* über ein Objekt der Basisklasse aufzurufen.

Das ist **typisch**: Die Konsequenzen der falschen Hierarchie zeigen sich oft erst recht **spät**, wenn ein Projekt schon weit fortgeschritten ist. Dann kann der **Aufwand für eine Korrektur** recht **hoch** sein. Deswegen sollte man beim Entwurf einer Klassenhierarchie **immer** darauf achten, dass sie eine „ist ein“-Beziehung darstellt.

Mit einer abstrakten Basisklasse *Punkt* bietet sich die folgende Alternative an:



In der Basisklasse *Punkt* definiert man dann alle diejenigen Funktionen als rein virtuell, die man in allen abgeleiteten Klassen der Hierarchie benötigt und überschreibt. Dann kann man diese Funktionen auch über einen Zeiger oder eine Referenz auf ein Objekt der Basisklasse für Objekte abgeleiteter Klassen aufrufen.

Diese Hierarchie hat gegenüber der von oben einige Vorteile:

- Man kann sie problemlos im Sinn einer „ist ein“-Beziehung interpretieren: Sowohl ein *C1DPunkt* als auch ein *C2DPunkt* oder ein *C3DPunkt* stellt einen Punkt dar. Die Gesamtheit aller Punkte umfasst sowohl die ein- als auch die zwei- und dreidimensionalen Punkte. Der Begriff „Punkt“ ist eine Verallgemeinerung der ein-, zwei- oder dreidimensionalen Punkte.
- Wenn die verschiedenen Klassen gleichnamige Funktionen mit unterschiedlichen Parametern haben (wie z.B. eine Funktion *setze*, die einen Punkt an eine Position setzt), können diese Funktionen in den abgeleiteten Klassen definiert werden, ohne dass sie sich gegenseitig verdecken.

Eine **gemeinsame Basisklasse** mit rein virtuellen Funktionen ist oft **die Lösung der mit „ist ähnlich wie ein“-Beziehungen verbundenen Probleme**. Die Basisklasse stellt dann einen **Oberbegriff** mit den Gemeinsamkeiten der Klassen dar, die im Programm benötigt werden. Da die Basisklasse nie als Datentyp von Objekten benötigt wird, sondern nur als Basisklasse bei einer Vererbung, kann sie auch **rein virtuell** sein. Sie entspricht einem Oberbegriff, von dem es keine realen Objekte gibt, die nicht zu einer spezielleren Kategorie gehören, und der nur dazu dient, Gemeinsamkeiten auszudrücken.

Beispiel: In der Umgangssprache findet man viele solche Oberbegriffe: „Wirbeltier“, „Lebewesen“, „Punkt“, „Fahrzeug“ usw. bezeichnen Oberbegriffe, von denen es keine Objekte gibt, die nicht zu einer konkreteren (abgeleiteten) Klasse gehören.

Die **Suche** nach den zur Lösung eines Problems hilfreichen **Abstraktionen** und Oberbegriffen ist der **Schlüssel** der objektorientierten Analyse und des objektorientierten Designs. Abstrakte Basisklassen und rein virtuelle Funktionen sind das Sprachelement, diese Abstraktionen und Gemeinsamkeiten auszudrücken.

Das gilt auch beim Design einer Klassenhierarchie mit dem Ziel, ihre Funktionen später einmal ohne Änderung des Quelltextes erweitern zu können (siehe Abschnitt 8.4.8). Auch eine solche Funktion sollte immer eine rein virtuelle Funktion in der Basisklasse sein.

Stroustrup (1997, Abschnitt 12.5) bezeichnet abstrakte Basisklassen „as a clean and powerful way of expressing concepts“. Meyers (1996, Item 33) und Riel (1996, Heuristic 5.7) empfehlen sogar, **alle Basisklassen abstrakt** zu definieren („All base classes should be abstract classes“, „make non-leaf classes abstract“), da solche Klassen leicht erweitert werden können.

Viele Klassenbibliotheken verwenden eine gemeinsame Basisklasse, von der dann alle Klassen abgeleitet werden. In den Microsoft Foundation Classes (MFC) heißt diese Klasse *CObject*, in der Visual Component Library (VCL) des Embarcadero C++Builders *TObject* und in der .NET Klassenbibliothek *Object*. Diese Basisklasse ist zwar nicht immer abstrakt. Innerhalb einer solchen Hierarchie gibt es aber oft zahlreiche abstrakte Klassen, die das Verhalten abgeleiteter Klassen definieren.

#### 8.4.11 Interfaces und Mehrfachvererbung

Eine Klasse, die nur aus rein virtuellen Funktionen besteht, wird auch als **Interface-Klasse** bezeichnet. Solche Interface-Klassen werden vor allem dazu verwendet, die Schnittstellen zu definieren, die alle abgeleiteten Klasse in einer Hierarchie definieren müssen.

In manchen Programmiersprachen (Java und C#) gibt es spezielle Schlüsselwörter (z.B. *interface*) um Interface-Klassen zu definieren. Der Compiler achtet dann darauf, dass eine Klasse die Anforderungen an eine Interface-Klasse erfüllt. In C++ muss der Entwickler selbst darauf achten, dass eine solche Klasse

- nur rein virtuelle Funktionen und einen virtuellen Destruktor enthält,
- die alle *public* sind, und
- keine Datenelemente, keine Funktionsdefinitionen und keine
- statischen Elemente

Interface-Klassen sind spezielle abstrakte Klassen: Eine Klasse wird als abstrakt bezeichnet, wenn sie mindestens eine rein virtuelle Funktion enthält. Sie kann außerdem noch Daten, Funktionsdefinitionen, statische Elemente usw. enthalten. Das alles ist bei Interface-Klassen nicht zulässig.

Interfaces gehören zu den wenigen Klassen, für die **Mehrfachvererbung** sinnvoll sein kann. Da ein Interface keine Datenelemente und nur rein virtuelle Funktionen enthält, können keine Mehrdeutigkeiten entstehen. In den Sprachen Java oder C# sind Interface-Klassen die einzigen Klassen, für die Mehrfachvererbung zulässig ist.

Eine Interface-Klasse kann nur als Basisklasse verwendet werden. Es ist nicht möglich, ein Objekt einer Interface-Klasse anzulegen. Eine Klasse, die eine Interface-Klasse als Basisklasse hat, wird als Implementation der Interface-Klasse bezeichnet, wenn sie alle Funktionen der Basisklasse überschreibt. Damit von einer Klasse, die eine Interface-Klasse als Basisklasse hat, ein Objekt angelegt werden kann, muss sie das Interface implementieren

Beispiel: Mit Interfaces kann man sicherstellen, dass eine Funktion nur mit Argumenten aufgerufen wird, die bestimmte Funktionen zur Verfügung stellt:

```
class IStringConvertible {
public:
    virtual std::string to_string() const = 0;
    virtual ~IStringConvertible() = default;
};

class IComparable {
public:
    virtual bool CompareTo() const = 0;
    virtual ~IComparable() = default;
};

class IZweiInterfaces :public IStringConvertible, public
                        IComparable {};

std::string f(const IZweiInterfaces& i)
{
    if (i.CompareTo())
        return "< " + i.to_string();
    else
        return "> " + i.to_string();
}

class Class_1 :public IZweiInterfaces
{
    int x, y;
public:
    virtual std::string to_string() const override
    {
        return std::to_string(x);
    };
};
```

```

    bool CompareTo() const override
    {
        return x < y;
    };
};

class Class_2 {};

void test()
{
    Class_1 c1;
    f(c1);
    Class_2 c2;
    f(c2); // das geht nicht
}

```

#### 8.4.12 Objektorientierte Programmierung: Zusammenfassung

Mit den bisherigen Ausführungen dieses Kapitels sind alle Konzepte der objektorientierten Programmierung vorgestellt. Das soll der Anlass für einen kurzen Rückblick sein, der die Verwendung dieser Konzepte in die beiden Gruppen der konkreten und abstrakten Datentypen zusammenfasst.

- Die letzten Abschnitte haben gezeigt, dass Vererbung und Polymorphie außerordentlich hilfreich sein können. Das heißt aber nicht, dass alle Klassen diese Konzepte verwenden müssen.

Es gibt viele nützliche Klassen, die nicht in einer Hierarchie enthalten sind und die unabhängig von anderen Klassen existieren. Solche Klassen stellen meist ein relativ einfaches, in sich geschlossenes Konzept der Realität mit allen dafür notwendigen Funktionen dar. Sie werden auch als **konkrete Typen** bezeichnet und haben oft Ähnlichkeiten mit den fundamentalen Datentypen. Dazu gehören z.B. Stringklassen, Containerklassen usw. Auch Klassen wie *C1DPunkt*, *C2DPunkt*, *Kreis*, *Quadrat* usw. sind konkrete Typen, wenn sie nicht in einer Klassenhierarchie enthalten sind.

Konkrete Typen benutzen Klassen, um Daten und Funktionen zusammenzufassen. Da sie normalerweise nicht als Basisklassen dienen, können ihre Funktionen ebenso gut virtuell wie auch nicht virtuell sein. Deshalb sind sie meist nicht virtuell und damit etwas schneller. Wenn konkrete Typen von anderen Klassen verwendet werden, dann meist als Datentypen von Elementen und nicht als Basisklassen. Manche Autoren sprechen von **objektbasierter Programmierung**, wenn nur das Klassenkonzept ohne Vererbung verwendet wird.

- Wenn mehrere Klassen eine gemeinsame Schnittstelle haben, kann man diese in einer Basisklasse zusammenfassen. Die Funktionen der Schnittstelle der Basisklasse sind oft rein virtuell. Dann wird die Basisklasse auch als **abstrakter Typ** bezeichnet. Abstrakte Typen haben oft **keine Konstruktoren**, **keine Datenelemente** und **nur rein virtuelle Funktionen** sowie **einen virtuellen Destruktor**.

Die Basisklasse stellt dann einen Oberbegriff (eine Abstraktion) dar, und die abgeleiteten Klassen implementieren dann spezifische Varianten der Schnittstelle. Diese Funktionen sind über die Technik der späten Bindung an ihre Klassen gebunden und verhalten sich dadurch so, als ob sie in der Klasse enthalten wären.

Die spezifischen Varianten können auch noch später geschrieben werden. Wenn die Möglichkeit besteht, dass eine Funktion später einmal erweitert werden muss, sollte man sie als virtuelle Funktion schreiben, da man die Erweiterung dann ohne Änderung des Quelltextes der Basisklasse implementieren kann.

**Vererbung ohne virtuelle Funktionen ist nur selten sinnvoll.** Wenn Klassen voneinander abgeleitet werden, dann haben sie meist auch virtuelle Funktionen. In einer Basisklasse sind die virtuellen Funktionen oft rein virtuell. Deswegen ergänzen sich **Vererbung, virtuelle Funktionen und rein virtuelle Funktionen und treten oft gemeinsam auf.**

Es ist sicher nicht leicht, beim Entwurf eines Buchhaltungsprogramms für eine Tierhandlung vorauszuahnen, dass sie später auch einmal mit Autos handeln wird. Wenn man aber die Abstraktion findet, dass die Objekte eines Buchhaltungsprogramms Buchungen sind, kann man vermutlich einen großen Teil des Programms auf eine entsprechende Basisklasse aufbauen. Und von dieser kann man dann leicht auch Klassen für Immobilien und Grundstücke ableiten, wenn der geschäftstüchtige Händler in diese Bereiche expandiert.

Deshalb fallen viele Klassen (aber nicht alle) in eine dieser beiden Kategorien (siehe auch Sutter 2005, Item 32): **Entweder** soll eine Klasse nicht als **Basisklasse** verwendet werden. Dann

- stellt sie ein Konzept der Realität vollständig (und minimal) dar.
- hat sie keine virtuellen Funktionen und auch keinen virtuellen Destruktor.
- wird sie vor allem wie ein fundamentaler Datentyp als Wertetyp verwendet (z.B. als Datentyp einer Variablen oder eines Klassenelements).
- hat sie einen *public* Destruktor, Kopierkonstruktor und Zuweisungsoperator mit Wert-Semantik.

**Oder** sie wird als **Basisklasse** verwendet. Dann

- stellt sie einen Oberbegriff für ein Konzept der Realität (eine Abstraktion, die Gemeinsamkeiten) dar, das in abgeleiteten Klassen konkretisiert oder später erweitert wird.
- hat sie virtuelle und meist auch rein virtuelle Funktionen
- hat sie einen virtuellen Destruktor
- wird sie vor allem für dynamisch erzeugte Variablen verwendet und über Zeiger (am besten smart pointer) angesprochen.

Programmierer, die die Konzepte Vererbung und Polymorphie neu kennengelernt haben, neigen oft dazu, sie bei jeder nur denkbaren Gelegenheit einzusetzen. Das führt dann oft zu völlig unangemessenen Klassenhierarchien, bei denen oft keine „ist-ein“-Beziehung besteht.

- In vielen praktischen Projekten sind **konkrete Klassen**, die dann als Datentypen von Datenelementen (**Komposition**) oder Variablen verwendet werden, viel häufiger die richtige Wahl als **Basisklassen**, die zusammen mit **Vererbung** eingesetzt werden.
- Objektorientierte Programmierung ist nicht nur Vererbung und Polymorphie. Oft sind die mit der Zusammenfassung von Daten und Funktionen zu **Klassen** und die mit einer **Datenkapselung** verbundenen Vorteile völlig ausreichend.

Die C++-Standardbibliothek beruht maßgeblich auf Templates und verwendet Vererbung und Polymorphie nur selten.

## 8.5 R-Wert Referenzen und Move-Semantik

Bekanntlich können flache Kopien ziemlichen Ärger verursachen (z.B. im Zusammenhang mit dem Kopierkonstruktor und dem Zuweisungsoperator): Wenn eine Klasse Verweise auf Ressourcen (z.B. Zeiger auf Speicherbereiche) enthält und bei der Kopie einer Variablen dieses Datentyps nur die Verweise, aber nicht die Ressourcen kopiert werden, kann die Ressource nach der Kopie über zwei verschiedene Variablen angesprochen werden.

Diese negativen Folgen treten aber nur dann ein, wenn die Quelle der Kopie auch nach der Kopie noch existiert. Existiert sie nach der Kopie nicht mehr, muss eine flache Kopie nicht mit negativen Konsequenzen verbunden sein. Dann können flache Kopien auch sinnvoll sein, insbesondere da sie schneller sind, da die Ressource nicht kopiert werden muss.

Zu den größeren konzeptionellen Erweiterungen von C++11 gehört, dass der Compiler um die Möglichkeit erweitert wurde, solche Situationen zu erkennen. Dafür wurde der Begriff **R-Wert** geprägt: Ein R-Wert ist ein Ausdruck auf der rechten Seite einer Zuweisung, der nach der Ausführung der Zuweisung nicht mehr existiert. Dann kann der Compiler anstelle einer tiefen Kopie eine meist etwas schnellere **move-Operation** (im Wesentlichen eine flache Kopie) durchführen.

Dieses Kapitel stellt diese Konzepte etwas genauer vor. Da keines dieser Konzepte für ein Grundverständnis von C++ wichtig ist, sondern „nur“ Feinheiten und Optimierungsmöglichkeiten bietet, kann der Leser dieses Kapitel auch übergehen. Diese Techniken wurden in die Standardbibliothek übernommen, so dass Sie diese nutzen können, auch ohne dass Sie sich darum kümmern müssen.

### 8.5.1 R-Werte und R-Wert Referenzen

Vor C++11 gibt es keine Möglichkeit, R-Werte (dazu gehören alle Ausdrücke, auf die man den Adressoperator nicht anwenden kann, wie z.B. temporäre Objekte, Literale, Funktionsaufrufe mit Wert-Rückgabetypen usw.) von konstanten Referenzen als Typ zu unterscheiden.

Beispiel: Mit



```

class C {
public:
    C(int x) {}
};

int f(int i, int j)
{
    return i + j;
}

```

sind in

```

int a = 17;
int b = 18;
b = a*b;
C c(19);
c = C(20);
int d = f(21, 22);

```

a, b, c und d L-Werte. Die Literale 17, 18, das temporäre Objekt C(20) und der Funktionsaufruf f(21,22) sind dagegen R-Werte. Diese können nicht auf der linken Seite einer Zuweisung stehen.

Die Begriffe „L-Wert“ und „R-Wert“ kommen ursprünglich aus C: In C war ein L-Wert ein Wert, der auf der linken Seite einer Zuweisung stehen kann (z.B. eine Variable). Ein R-Wert war ein Wert, der nur auf der rechten Seite einer Zuweisung stehen kann (z.B. ein Literal). Mit den zahlreichen Spracherweiterungen von C++ ist diese Definition aber nicht mehr immer zutreffend (z.B. mit Referenz-Rückgabetypen, „konstanten Variablen“ usw.). Obwohl temporäre Objekte (R-Werte) und konstante Referenzen viele Ähnlichkeiten haben, unterscheiden sie sich in einem wichtigen Punkt:

- Ein **temporäres Objekt** existiert nach seiner Auswertung nicht mehr. Deswegen kann es danach verändert oder zerstört werden, ohne dass das Auswirkungen auf andere Programmteile hat.
- Ein Objekt, das über eine **konstante Referenz** angesprochen wird, existiert auch noch nach der aktuellen Ausdrucksanweisung. Da andere Anweisungen auf dieses Objekt zugreifen können, darf es nach seiner Auswertung nicht verändert werden.

Seit C++11 werden L-Werte meist dadurch charakterisiert, dass sie auch noch nach einer Anweisung angesprochen werden können, bzw. dass sie eine Adresse haben, über die sie angesprochen werden können.

In C++11 können L-Werte und R-Werte mit **R-Wert Referenzen** unterschieden werden. Dieser Typ wird mit zwei Referenzzeichen && gekennzeichnet. Damit können Funktionen geschrieben werden, die diese beiden Fälle unterschiedlich behandeln. Die schon früher in C++ vorhandenen Referenzen (mit nur einem &-Zeichen) werden als **L-Wert Referenzen** bezeichnet, wenn es auf den Unterschied zwischen diesen beiden Begriffen ankommt.

Beispiel: Mit den beiden überladenen Funktionen

```

int f(const int&)
{
    cout << "int&" << endl; return 0;
}

int f(int&&)
{
    cout << "int&&" << endl; return 0;
}

```

führen die Aufrufe

```

int i = 17;
f(i);          // f(const int&)
const int ci = 17;
f(ci);         // f(const int&)
f(5);          // f(int&&)
f(int(5));     // f(int&&) - Konstruktor-Syntax
int j = 18;
f(i + j);      // f(int&&)
f(f(i + j) + f(i + 1)); // f(int&&), f(int&&), f(int&&)

```

zum Aufruf der als Kommentar angegebenen Funktionen.

Die Fähigkeit, R-Wert Referenzen zu erkennen, ermöglicht für Argumente dieser Kategorie flache Kopien. Da eine R-Wert Referenz keine Adresse hat, kann sie nach der Kopie nicht mehr angesprochen werden. Damit können die sonst mit flachen Kopien verbundenen Nachteile auch nicht auftreten. Da flache Kopien schneller sind, reduziert das die Laufzeit.

Beispiel: Wenn die Funktion `int f(int&&)` schneller ist als `int f(const int&)`, kommt dieser Vorteil bei Ausdrücken wie

```
int x = f(f(i + j) + f(i + 1));
```

mehrfach zum Tragen. Solche Ausdrücke kommen oft bei Operationen mit Operatoren vor, wie z.B. `string operator+(string, string)` und Anweisungen wie

```
string s = s1 + s2 + s3 + s4; //string s1, s2, s3, s4
```

Dieser Aufruf wird etwa folgendermaßen aufgelöst:

```
s = op+(s1, op+(s2, op+(s3, s4)));
```

R-Wert Referenzen wurden so in C++ integriert, dass der Ablauf von Programmen, die mit einem C++03-Compiler übersetzt werden, unverändert bleibt.

– Falls eine Funktion nur für L-Wert Referenzen

```
void f(int& x) {}
```

implementiert ist, aber nicht für R-Wert Referenzen, kann diese nur mit L-Werten (aber nicht mit R-Werten) aufgerufen werden:

```
int i;
f(i); // das geht
f(1); // Aufruf mit R-Wert ist ein Fehler
```

- Falls eine Funktion nur für konstante L-Wert Referenzen

```
void f(const int& x) {}
```

implementiert ist, aber nicht für R-Wert Referenzen, kann diese sowohl mit L-Werten als auch mit R-Werten aufgerufen werden:

```
int i;
f(i); // das geht
f(1); // das geht
```

- Falls eine Funktion nur für R-Wert Referenzen implementiert ist

```
void f(const int&& x) {}
```

kann diese nur mit R-Werten aufgerufen werden, aber nicht mit L-Werten.

```
int i;
f(i); // das geht nicht
f(1); // das geht
```

### 8.5.2 move-Semantik

R-Wert Referenzen wurden vor allem deswegen eingeführt, um **move-Semantik** zu ermöglichen. Dabei werden oft flache Kopien erzeugt.

Dieses Konzept soll zunächst an einem Beispiel illustriert werden.

Beispiel: Hier soll C eine Klasse sein, die einen Zeiger *pData* auf eine „größere Ressource“ *\*pData* enthält. Mit „größere Ressource“ ist gemeint, dass Konstruktion, Kopie oder Destruktion eines Objekts der Klasse C mit einem gewissen Zeitaufwand verbunden sind, wie z.B. bei einem Container der Standardbibliothek mit vielen Elementen. Der Kopierkonstruktor (und analog der Zuweisungsoperator) sieht dann etwa so aus:

```
C& C::operator=(const C& rhs)
{
    // Die Ressource, auf die pData zeigt, freigeben.
    // Eine Kopie von *rhs.pData erstellen und
    // pData die Adresse der Kopie zuweisen.
    // [...]
}
```

Wenn diese Klasse mit einer Funktion, die ein Objekt des Typs C zurückgibt

```
C f();
```

in

```
C c;  
c = f(); // f() ist ein R-Wert
```

verwendet wird, bewirkt diese Zuweisung, dass

die Ressource `*(c.pData)` freigegeben wird,  
eine Kopie von `*(f().pData)` erstellt wird, und  
`c.pData` diese Adresse dieser Kopie zugewiesen wird.

Da die rechte Seite `f()` in der Zuweisung

```
c = f();
```

ein R-Wert ist und anschließend nicht mehr verwendet werden kann (er hat ja keine Adresse), kann man die relativ aufwendige Kopie des Speicherbereichs `*(f().pData)` sparen und stattdessen nur die Adresse zuweisen. Das ist eine flache Kopie. Da die rechte Seite keine Adresse hat, können die mit L-Werten verbundenen Fehler von flachen Kopien nicht eintreten. Diese Vorgehensweise wird als **move-Semantik** bezeichnet. Sie ist mit einem Kopierkonstruktor (bzw. Zuweisungsoperator) sinnvoll, dessen Parameter eine R-Wert Referenz ist.

Beispiel: Ergänzt man die Klasse aus dem letzten Beispiel um einen überladenen Zuweisungsoperator

```
C& C::operator=(C&& rhs)  
{  
    // [...]  
    // vertausche this->pData und rhs.pData  
    // [...]  
}
```

und einen Konstruktor mit einem R-Wert Referenzparameter

```
C(C&& rhs)  
{  
    // [...]  
    // vertausche this->pData und rhs.pData  
    // [...]  
}
```

werden diese mit Argumenten aufgerufen, die R-Werte sind. Das sind aber gerade die Argumente, bei denen es ausreicht, die Zeiger zu vertauschen.

Eine Zuweisung anstelle dem Vertauschen

```
this->pData = rhs.pData
```

wäre übrigens nicht ausreichend, damit später noch der Destruktor aufgerufen kann, um die Daten zu *rhs* wieder freizugeben.

Die Elemente aus dem letzten Beispiel werden als **move-Konstruktor** (Verschiebekonstruktor) und als **move-Zuweisungsoperator** (Verschiebezuweisungsoperator) bezeichnet.

### 8.5.3 R-Werte mit `std::move` erzwingen

Mit dem Funktions-Template (siehe Abschnitt 14.1) `std::move`

```
template <class T>
constexpr remove_reference_t<T>&& move(T&& _Arg)
{
    return static_cast<remove_reference_t<T>&&>(_Arg);
}
```

kann man den Compiler dazu bringen, einen Wert als R-Wert behandeln, obwohl er kein R-Wert ist. Obwohl der Name *move* den Eindruck erwecken könnte, dass damit eine *move*-Operation durchgeführt wird, trifft das nicht zu: `std::move` ist ein *static\_cast*, der immer den Typ `T&&` zurückgibt, unabhängig davon, ob das Argument den Typ `T`, `T&` oder `T&&` hat. Diese einheitliche Behandlung der Datentypen `T`, `T&` und `T&&` wird mit Hilfe der Funktion `remove_reference_t<T>` erreicht, die aus jedem der Typ-Argumente `T`, `T&` oder `T&&` immer den Datentyp `T` macht.

Der Effekt ist im Wesentlichen der von

```
X&& std::move(X& a) noexcept // noexcept: Siehe Abschnitt 10.8
{
    return static_cast<X&&>(a);
}
```

Die Behandlung eines Wertes als R-Wert kann nämlich auch mit Werten sinnvoll sein, die gar keine R-Werte sind. Das ist z.B. beim klassischen Algorithmus zum Vertauschen von zwei Werten der Fall. Dieser war in der Standardbibliothek vor C++11 etwa folgendermaßen definiert:

```
template<class T>           // hier steht T für einen beliebigen
Datentyp,
void swap(T& a, T& b)       // für den Zuweisungen möglich sind
{
    T tmp(a);               // Zeitaufwand für eine Kopie und 2x Speicherplatz
    a = b;                  // Zeitaufwand für eine Kopie von b nach a
    b = tmp;                // Zeitaufwand für eine Kopie von b nach a
}
```

Die Kommentare geben den Zeitaufwand und Speicherplatzbedarf beim Aufruf dieser Funktion an.

Da die lokale Variable `a` nach der ersten Zuweisung nicht mehr benötigt wird, kann man hier move-Semantik verwenden. Deshalb wurde der *swap*-Algorithmus in der Standardbibliothek ab C++11 durch

```
template<class T>
void swap(T& a, T& b) // ab C++11
{
    T tmp(std::move(a)); // Zeitaufwand für ein move und 1x
                           Speicherplatz
    a = std::move(b);     // Zeitaufwand für ein move
    b = std::move(tmp);   // Zeitaufwand für ein move
}
```

ersetzt. Bei dieser neuen Version von *swap* fallen gegenüber der alten Version drei move-Operationen anstelle von drei copy-Operationen an. Außerdem wird nur einmal Speicherplatz benötigt. Bei Datentypen, bei denen ein *move* schneller als eine Kopie ist, ist das *swap* aus C++11 schneller. Programme, die *std::swap* verwenden, sind seit C++11 schneller, ohne dass am Quelltext etwas geändert wurde.

Der Geschwindigkeitsvorteil hängt natürlich von den beteiligten Datentypen und Operationen ab. Falls man alle copy-Operationen durch move-Operationen ersetzen kann, ist der Unterschied beträchtlich. Die Tabelle

| Benchmarks VS 2019.5 x64 Release /O2<br>vector mit n strings der Länge m | n=1000,<br>m=100'000 | n=100'000,<br>m=1000 |
|--------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|
| copy construct                                                           | 0,060 Sek.           | 0,070 Sek.           |
| move construct                                                           | 0,007 Sek.           | 0,012 Sek.           |

enthält mit einem vector `v` mit `n` Strings der Länge `n`

```
std::vector<std::string> v = ...; // Ein vector mit n Strings der
                                   Länge n
```

unter a) die Laufzeiten für 100 copy-Operationen

```
std::vector<std::string> c(v);
```

und unter b) die Laufzeiten für entsprechende move-Operationen.

```
std::vector<std::string> m(std::move(v));
```

Einsatzmöglichkeiten für b) sind aber in der Praxis nur selten gegeben, da die rechte Seite durch *move* ungültig wird.

In der Praxis wird man nur einen Teil der copy-Operationen durch move-Operationen ersetzen können. In der nächsten Tabelle wird ein *vector* mit Strings mit dem Auswahlort sortiert. Das Vertauschen findet einmal mit einem *copy\_swap* (wie vor C++11) und einmal mit einem *std::swap* (mit move-Semantik, wie ab C++11) statt:

| Benchmarks VS 2019.5 x64 Release /O2<br>vector mit n strings der Länge m | n=100,<br>m=10000 | n=1000,<br>m=1000 | n=10000<br>m=100 |
|--------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| Auswahlsort mit <code>copy_swap</code>                                   | 0,00015 Sek.      | 0,004 Sek.        | 0,4 Sek.         |
| Auswahlsort mit <code>move_std::swap</code>                              | 0,00003 Sek.      | 0,003 Sek.        | 0,4 Sek.         |

Die Algorithmen der Standardbibliothek verwenden die *move*-Semantik auch noch an anderen Stellen als bei *swap*, weshalb diese Algorithmen oft schneller sind als selbstgeschriebene Funktionen mit demselben Ergebnis.

Der Effekt von

```
a = std::move(b);
```

mit einem L-Wert *b* hängt vor allem vom Datentyp ab.

1. Für Objekte eines Klassentyps *C*, der einen *move*-Zuweisungsoperator hat, bewirkt die Zuweisung

```
a = std::move(b); // C.operator=(C&&), a.operator=(std::move(b));
```

dass der *move*-Zuweisungsoperator aufgerufen wird. Dabei erhält *a* den Wert von *b*. *b* hat anschließend einen unbestimmten Wert. Für Klassen aus der Standardbibliothek ist der Wert von *b* in dem Sinn ein gültiger Wert, dass man *b* verwenden kann, ohne dass das eine Exception zur Folge hat.

Da der Wert von *b* nach *a = std::move(b)* unbestimmt ist, sollte man *b* anschließend nie verwenden. Insbesondere ist ein *move* mit einer globalen Variablen *b* nie sinnvoll.

Da sich der Wert von *b* durch

```
a = std::move(b);
```

verändern kann, spricht man auch von einem **destruktiven Read**. Dass sich das Argument der rechten Seite bei einem Funktionsaufruf ändert, wirkt manchmal etwas überraschend.

2. Für Objekte eines Datentyps, der keinen *move*-Zuweisungsoperator hat, bewirkt

```
a = std::move(b);
```

nichts anderes als die Zuweisung *a=b*;

Beispiel: Der Effekt von *move* für einige Datentypen:

- a) Der Datentyp *int* hat keinen *move*-Zuweisungsoperator:

```
int i = 17, j = 18;
j = std::move(i);
cout<<"int i=17, j=18; j= move(i); j=" << j << " i=" << i ;
// int i=17, j=18; j=move(i); j=17 i=17
```

- b) Die Klasse `string` hat seit C++11 einen move-Zuweisungsoperator.

`basic_string& operator=(basic_string&& _Right)`

Mit

```
string s = "s", t = "t";
s = std::move(t);
cout << "string s='s',t='t'; s= move(t); s=" << s << " t="
    << t << endl;
```

erhält man in Visual Studio 2019 die Ausgabe

```
string s='s',t='t'; s= move(t); s=t t=
```

In gcc 5.1 erhält man dagegen

```
move string s='s',t='t'; s= move(t); s=t t=s
```

Beide Ergebnisse sind standardkonform, da der Wert des Arguments von `move` anschließend unbestimmt ist.

- c) Bei einem `unique_ptr` (siehe Abschnitt 18.2) wird die rechte Seite auf 0 gesetzt.

```
unique_ptr<int> p1(new int(7));
unique_ptr<int> p2(new int(8));
p2 = std::move(p1); // p1==0
```

In einer Funktion mit einem Parameter des Typs `T&&`

```
void fc(T&& s)
{
    T t = s; // ruft den Kopierkonstruktor auf, obwohl s mit dem
              Datentyp T&& definiert ist
}
```

könnte man meinen, dass der Datentyp von `s` aufgrund der Parameterliste eine R-Wert Referenz ist. **Dieser Eindruck trügt** aber: Das entscheidende Kriterium ist, ob der Ausdruck einen Namen hat, und da der Parameter hier einen Namen hat, unter dem er auch noch nach der Anweisung angesprochen werden kann, ist `s` kein R-Wert. Deshalb wird hier auch nicht der move-Konstruktor aufgerufen, sondern der Kopierkonstruktor.

Will man erreichen, dass mit einem solchen Parameter der move-Konstruktor aufgerufen wird, kann man ihn mit `std::move` in einen R-Wert konvertieren:

```
void fm(T&& s)
{
    T t = std::move(s); // ruft den move-Konstruktor auf
}
```



Klassen, die **nur** einen **move-Konstruktor** und einen **move-Zuweisungsoperator** haben, aber **keinen Kopierkonstruktor** und auch **keinen Kopier-Zuweisungsoperator**, sind **verschiebbar, aber nicht kopierbar**. Dazu gehören z.B. die Streamklassen. Funktionen, die Streams als Wert zurückgeben, waren früher nicht möglich.

Beispiel: Da die Klasse *ifstream* einen move-Zuweisungsoperator hat,

```
std::ifstream get_f(string path)
{
    std::ifstream f(path);
    return f;
}
```

wird dieser bei

```
std::ifstream inf = get_f("");
```

aufgerufen.

Auch die Klasse *unique\_ptr* ist nicht kopierbar, sondern nur verschiebbar.

```
unique_ptr<int> p1(new int(7));
unique_ptr<int> p2(new int(8));
p2 = p1; // das geht nicht
```

Der Aufruf eines Konstruktors mit einem R-Wert muss nicht zum Aufruf des entsprechenden move-Konstruktors führen. Der C++-Standard erlaubt ausdrücklich, dass ein Argument direkt in lokale Variable konstruiert werden kann. Dann wird der move-Konstruktor nicht aufgerufen. Entsprechendes gilt für *return*-Rückgabewerte.

Beispiel: Der Aufruf von

```
void fs(MeinString s) { }
```

in

```
fs(MeinString("789"));
```

führt nicht zum Aufruf des move-Konstruktors, ebenso wenig wie der von

```
MeinString fret()
{
    return MeinString("ret");
}
```

in

```
MeinString s = fret();
```

In diesen beiden Beispielen kann man zwar mit `std::move` erzwingen, dass der move-Konstruktor aufgerufen wird. Das bringt aber keinen Vorteil, da die Returnwert-Optimierung meist effizienter ist als der move-Konstruktor.

### 8.5.4 Move-Semantik in der C++11 Standardbibliothek

Mit der Einführung der move-Semantik wurden alle Klassen der Standardbibliothek umfassend um move-Semantik und um überladene Funktionen erweitert, die move-Semantik nutzen (seit Visual Studio 2010). Da der Compiler sie automatisch verwendet, stehen die damit verbundenen Laufzeitverbesserungen automatisch für alle Klassen zur Verfügung, die move-Semantik besitzen. Man muss nicht einmal wissen, dass es diese Konzepte gibt.

Die Klasse `std::string` enthält u.a. die folgenden Funktionen mit R-Value Referenzparametern:

```
inline string operator+(const string& _Left, string&& _Right)
{ // return string + string
  return (std::move(_Right.insert(0, _Left)));
}

inline string operator+(string&& _Left, string& _Right)
{ // return string + string
  return (std::move(_Left.append(_Right)));
}

inline string operator+(string&& _Left, string&& _Right)
{ // return string + string
  if (_Right.size() <= _Left.capacity() - _Left.size()
      || _Right.capacity() - _Right.size() < _Left.size())
    return (std::move(_Left.append(_Right)));
  else
    return (std::move(_Right.insert(0, _Left)));
}

inline string operator+(const char*_Left, string&& _Right)
{ // return NTCS + string
  return (std::move(_Right.insert(0, _Left)));
}
```

Ähnliche Funktionen findet man auch in den anderen Containerklassen.

Implementiert man move-Semantik in eigenen Klassen, wird diese auch in der Standardbibliothek genutzt. So führt z.B.

```
std::vector<MeinString> v;
v.push_back(MeinString("1")); // Aufruf von void push_back(T&& val)
```

eine move-Operation aus, wenn die Klasse *MeinString* move-Semantik besitzt. Ohne move-Semantik werden die Kopier-Semantik Operationen verwendet.

Die Container-Klassen wurden um Funktionen erweitert, die für move-Semantik optimiert sind. Dazu gehören z.B. die *emplace*-Methoden von *vector*, *deque*, *list* und den assoziativen Containern:

```
template <class... Args> decltype(auto) emplace_front(Args &&...  
                                                    args)  
template <class... Args> decltype(auto) emplace_back(Args&&...  
                                                    args)  
template <class... Args> iterator emplace(const_iterator position,  
                                           Args&&... val)
```

Diese fügen wie *push\_back*, *push\_front* usw. die Argumente in den Container ein (bei *vector* gibt es kein *emplace\_front*, und bei *forward\_list* kein *emplace\_back*). Der entscheidende Unterschied zu *push\_back* ist, dass sie die Argumente direkt in den Container konstruieren und sie nicht kopieren oder verschieben.

Beispiel: Füge einen string in v ein:

```
vector<string> v;  
v.emplace_back("1"); // v.size() = 1
```

### 8.5.5 Move-Semantik für eigene Klassen

Falls eine Klasse **keinen move-Zuweisungsoperator oder –Konstruktor** hat, wird der Kopier-Zuweisungsoperator oder –Konstruktor aufgerufen. Deshalb ist es **kein Fehler**, wenn diese move-Funktionen für eine Klasse nicht definiert werden. Der einzige Nachteil ist dann nur, dass ein Optimierungspotential nicht genutzt wird und die entsprechenden Operationen etwas länger dauern können. Dieser Nachteil ist aber nur spürbar, wenn große Datenmengen kopiert werden müssen. Dass die fehlenden move-Funktionen kein Fehler sind, unterscheidet sie von den Kopierfunktionen: Ein vergessener Kopierkonstruktor oder Kopier-Zuweisungsoperator kann ein gravierender Fehler sein.

Betrachten wir nun als Nächstes, wie man eine eigene Klasse um move-Semantik erweitern kann. Der Ausgangspunkt soll eine rudimentäre String-Klasse aus C++03 (ohne R-Wert Referenzen) sein:

```
class MeinString {  
    char* s;  
    int length;  
public:  
    // weitere Konstruktoren usw. werden hier ausgelassen  
  
    MeinString(const MeinString& r)  
    { // Kopier-Konstruktor  
        length = r.length;  
        s = new char[length];  
        strcpy(s, r.s);  
    }  
}
```

```

MeinString& operator=(const MeinString& x)
{ // Kopier-Zuweisungsoperator
  if (this != &x)
  {
    delete[] s;
    length = x.length;
    s = new char[length + 1];
    strcpy(s, x.s);
  }
  return *this;
};

// move-Konstruktor und move-Zuweisungsoperator hier einfügen
};

```

Um diese Klasse um move-Semantik zu erweitern, muss sie um einen **move-Konstruktor** und einen **move-Zuweisungsoperator** ergänzt werden.

Im **move-Konstruktor** weist man alle Datenelemente der Quelle den entsprechenden Datenelementen des Ziels zu und setzt dann die Datenelemente der Quelle auf Standardwerte. Falls das Datenelement ein Zeiger ist, setzt man diesen auf *nullptr* (gleichwertig: auf 0), damit der Destruktor den Speicherbereich für den Zeiger nicht zweimal freigibt (einmal für die lokale Variable zum Argument und einmal für das Argument).

```

MeinString(MeinString&& r)
{ // move-Konstruktor
  // Datenelemente zuweisen:
  s = r.s;          // Nur die Zeiger zuweisen
  length = r.length;
  // Datenelemente des Arguments auf Standardwerte setzen
  r.s = nullptr; // delete[] r.s; wäre hier ein Fehler
  r.length = 0;
}

```

Im **move-Zuweisungsoperator** prüft man, ob das Objekt nicht sich selbst zugewiesen wird. Falls das nicht zutrifft, gibt man den Speicherbereich für die linke Seite frei. Dann führt man dieselben Anweisungen wie im move-Konstruktor aus, und gibt anschließend *\*this* zurück:

```

MeinString& operator=(MeinString&& r)
{ // move-Zuweisungsoperator
  if (this != &r)
  {
    delete[] s;
    // Datenelemente zuweisen:
    s = r.s;          // Nur die Zeiger zuweisen
    length = r.length;
  }
  return *this;
}

```

```

        // Datenelemente des Arguments auf Standardwerte setzen
        r.s = nullptr;
        r.length = 0;
    }
    return *this;
}

```

Im move-Konstruktor und –Zuweisungsoperator sollte **nie eine Exception** ausgelöst werden. Das ist meist auch möglich, da nur Zeiger kopiert werden. Dann kennzeichnet man die Funktion mit *noexcept* (siehe Abschnitt 10.8).

Ein **move-Konstruktor** bzw. ein **move-Zuweisungsoperator** werden implizit vom **Compiler erzeugt**, wenn die

- die Klasse keinen benutzerdefinierten move-Konstruktor bzw. move-Zuweisungsoperator hat

und die folgenden Voraussetzungen alle erfüllt sind:

- die Klasse hat keinen benutzerdefinierten Kopierkonstruktor
- die Klasse hat keinen benutzerdefinierten Zuweisungsoperator
- die Klasse hat keinen benutzerdefinierten Destruktor
- (bis C++14) der implizit erzeugte move-Konstruktor wird nicht als *deleted* gekennzeichnet

Der implizit erzeugte move-Konstruktor bzw. move-Zuweisungsoperator einer Klasse C haben die Signatur

```

C::C(C&&)
C& C::operator=(C&&).

```

Wenn man für eine Klasse move-Semantik implementieren will,

- muss man immer beide Funktionen implementieren: Den move-Konstruktor und den move-Zuweisungsoperator.
- wird die Dreierregel zur **Fünferregel**: Da der Compiler den move-Zuweisungsoperator und –konstruktor nur dann erzeugt, wenn man keinen Kopierkonstruktor und Zuweisungsoperator implementiert, muss man alle 5 Funktionen definieren (Kopierkonstruktor, Zuweisungsoperator, Destruktor, Verschiebekonstruktor und Verschiebeoperator).

Für **abgeleitete Klassen** implementiert man move-Semantik am einfachsten **auf der Basis der Elemente** und verwendet dazu *std::move*. Das nächste Beispiel ist ein allgemeingültiges Rezept nach „A Brief Introduction to Rvalue References“ (von Stroustrup, Hinnant und Kozicki, <http://www.open-std.org/jtc1/sc22/wg21/docs/papers/2006/n2027.html>)

```

class Derived : public Base
{
    std::vector<int> vec;
    std::string name;
    // ...
public:
    // ...

    Derived(Derived&& x)
        : Base(std::move(x)),
          vec(std::move(x.vec)),
          name(std::move(x.name)) { }

    Derived& operator=(Derived&& x)
    {
        Base::operator=(std::move(x));
        vec = std::move(x.vec);
        name = std::move(x.name);
        return *this;
    }
};

```

Auch hier wird der Aufruf des move-Konstruktors und –Zuweisungsoperators durch das Argument `std::move(x)` erreicht. Würde man statt dieses Arguments nur `x` verwenden, würden der Kopierkonstruktor und der Kopier-Zuweisungsoperator verwendet.

### 8.5.6 Perfect forwarding Θ

Gelegentlich will man den Datentyp des Arguments eines Funktions-Templates identisch in der Funktion haben. Das hört sich auf den ersten Blick trivial an. Wie aber schon an dem Beispiel in Abschnitt 8.5.3

```

void fc(T&& s)
{
    T t = s; // ruft den Kopierkonstruktor auf, obwohl s mit dem
              Datentyp T&& definiert ist
}

```

gezeigt wurde, ist das nicht so: Da der Parameter einen Namen hat, wird der Datentyp von `s` vom Compiler als L-Wert Referenz behandelt, obwohl in der Parameterliste eine R-Wert Referenz `T&&` angegeben ist.

Dieses Problem kann mit dem Funktions-Template `std::forward` gelöst werden, das in der Standardbibliothek etwa folgendermaßen definiert ist:

```

template< class T >
constexpr T&& forward(typename std::remove_reference<T>::type& t)
                                                                    noexcept
{
    return static_cast<T&&>(t);
}

template< class T >
constexpr T&& forward(typename std::remove_reference<T>::type&& t)
                                                                    noexcept
{
    return static_cast<T&&>(t);
}

```

Perfect forwarding wird in der Standardbibliothek z.B. bei den *make*-Funktionen für smart pointer (siehe Abschnitt 18.1) eingesetzt.

Beispiel: Die Funktion *std::make\_unique* ist im Wesentlichen folgendermaßen definiert:

```

template <class T>
inline std::unique_ptr<T> make_unique(T) // vereinfacht
{
    return unique_ptr<T>(new T(std::forward<T>()));
}

```

## 9 Namensbereiche

Große Programme oder Bibliotheken können viele Namen enthalten. Dann kann es leicht vorkommen, dass derselbe Name für verschiedene globale Bezeichner (z.B. Namen für Datentypen, Klassen, Funktionen usw.) benötigt wird.

In solchen Situationen können Namensbereiche Abhilfe schaffen. Mit einem **Namensbereich** kann man die **inhaltliche Zusammengehörigkeit** von globalen Deklarationen (Variablen, Funktionen, Datentypen usw.) explizit zum Ausdruck bringen und außerdem **Namenskonflikte vermeiden**.

Beispiel: In einem Teil eines Programms, das Mitarbeiter verwaltet, kann der Name *Adresse* genauso angemessen sein wie in einem anderen Teil des Programms, das Kunden verwaltet. In einer Programmiersprache wie C müsste man dann die Namen künstlich unterscheiden, z.B. *MitarbeiterAdressen* und *KundenAdressen*.

In C++ kann man die zusammengehörigen Deklarationen dagegen jeweils in einen eigenen Namensbereich aufnehmen und die Elemente dann innerhalb des Namensbereichs unter ihrem angemessenen Namen ansprechen:

```
namespace Kunden { // Ein sehr einfaches Beispiel
    class Adresse {
    public:
        Adresse(std::string Name = "", std::string id = "") {}
    };

    void zeige(Adresse a)
    { // ...
    }
} // end of namespace Kunden

namespace Mitarbeiter {
    class Adresse {
        // andere Elemente wie bei Kunden
    };

    void zeige(Adresse a)
    {
    }
} // end of namespace Mitarbeiter
```



Außerhalb eines Namensbereichs kann man seine Elemente mit den Namen des Namensbereichs, dem Bereichsoperator und den Namen des Elements ansprechen:

```
void MachWas()
{
    Kunden::Adresse k;
    Kunden::zeige(k);
    Mitarbeiter::Adresse m;
    Mitarbeiter::zeige(m);
}
```

Auf diese Weise lassen sich auch Namenskonflikte zwischen verschiedenen Bibliotheken (z.B. von verschiedenen Herstellern) vermeiden: Falls sie ihre Deklarationen in verschiedene Namensbereiche verpacken, kann man gleichnamige Elemente im Namensbereich über den Namen des Namensbereichs unterscheiden.

Beispiel: Die C++-Standardbibliothek hat alle ihre Elemente in den Namensbereich *std* aufgenommen. Wenn man diesen Namen nicht für einen eigenen Namensbereich verwendet (was man nicht tun sollte), bekommt man mit den Namen der Standardbibliothek nie Namenskonflikte.

Manche Kodierrichtlinien (z.B. die Misra-Regeln) empfehlen, alle Deklarationen außer der Funktion *main* in einen Namensbereich aufzunehmen.

## 9.1 Die Definition von Namensbereichen

Ein Namensbereich wird gemäß der Syntaxregel

```
inlineopt namespace identifier { namespace-body }
```

global oder in einem anderen Namensbereich deklariert. Ein *namespace-body* ist dabei eine beliebige Folge von Deklarationen (also z.B. Variablen, Funktionen, Klassen):

```
namespace-body:
    declaration-seqopt
```

Der Compiler gibt einem Element (z.B. *f*) aus einem Namensbereich (z.B. *N*) den Namen *N::f*. Im Namensbereich kann das Element aber nicht nur unter dem Namen *N::f*, sondern auch einfach unter dem Namen *f* angesprochen werden.

Beispiel: Die Namen *Adresse* und *zeige* gehören zum Namensbereich *Kunden*. Die Elemente können außerhalb des Namensbereichs unter dem Namen *Kunden::Adresse* und *Kunden::zeige* angesprochen werden:

```
Kunden::Adresse k;
Kunden::zeige(k);
```

Innerhalb des Namensbereichs *N* können sie allein unter ihrem Namen angesprochen werden:

```
void zeige(Adresse a)
```

Ein Namensbereich muss nicht mit einer einzigen *namespace*-Deklaration definiert werden, sondern kann sich aus mehreren solchen Deklarationen zusammensetzen, die auch in verschiedenen Dateien enthalten sein können. Alle Namensbereiche mit demselben Namen bilden dann einen einzigen Namensbereich.

Beispiel: Verteilt man die Deklarationen und die Definitionen auf eine Header-Datei und eine cpp-Datei, kann ein Namensbereich aus verschiedenen *namespace*-Definitionen in den beiden Dateien bestehen.

```
// In Kunden.h nur Deklarationen
#pragma once
namespace Kunden { // Ein sehr einfaches Beispiel
    class Adresse {
    public:
        Adresse(std::string Name = "", std::string id = "");
    };

    void zeige(Adresse a);
} // end of namespace Kunden

// In Kunden.cpp die Definitionen
#include "Kunden.h"
namespace Kunden { // Ein sehr einfaches Beispiel
    Adresse::Adresse(std::string Name, std::string id) {}
    void zeige(Adresse a)
    { // ...
    }
} // end of namespace Kunden
```

Ein Namensbereich kann auch innerhalb einer Datei aus mehreren *namespace*-Definitionen zusammengesetzt werden. Falls die Funktion *Kunden::zeige* eine globale Funktion *f* benötigt, ist das folgendermaßen möglich:

```
namespace Kunden {
    class Adresse { // wie oben
    };
} // end of namespace Kunden

int f(int n) { return n + 1; } // außerhalb des Namensbereichs

namespace Kunden { // Ein sehr einfaches Beispiel
    void zeige(Adresse a) {
        f(1);
    };
} // end of namespace Kunden
```

Die zu einer Deklaration aus einem Namensbereich gehörende Definition kann auch außerhalb des Namensbereichs stehen. Sie wird dann mit dem Namensbereich und dem Operator „::“ vor dem Namen gekennzeichnet. In einer solchen Definition können die Elemente des Namensbereichs ohne explizite Qualifizierung angesprochen werden.

Beispiel: In der Datei Kunden.cpp können die Elemente auch so definiert werden:

```
Kunden::Adresse::Adresse(std::string Name, std::string id)
{
}

void Kunden::zeige(Adresse a) // Keine explizite
{                               // Qualifizierung Kunden::Adresse notwendig
}
```

Da die Deklaration eines Namensbereichs ebenfalls eine Deklaration ist, können Namensbereiche **verschachtelt** werden. Auf die Elemente kann man dann mit einer verschachtelten Qualifizierung zugreifen.

Beispiel: Die Namensbereiche A und B sind im Namensbereich N enthalten:

```
namespace N {
    int i;           // 1.
    namespace A {
        int i;       // 2.
    }
    namespace B {
        int i;       // 3.
    }
} // end of namespace N
```

Ihre Elemente kann man ansprechen wie in

```
N::i = 17;    // 1.
N::A::i = 18; // 2.
N::B::i = 19; // 3.
```

Ab C++17 kann man verschachtelte Namensbereiche auch so definieren:

```
namespace N::A {
    int i;    // 2.
}

namespace N::B {
    int i;    // 3.
}
```

Diese Definition ist gleichwertig zu den Definitionen von A und B oben. Die Elemente kann man dann wie oben unter 2. und 3. ansprechen.

Verschachtelte Namensbereiche werden oft auch für vorläufige Versionen von Sprach-erweiterungen verwendet. In Visual Studio stehen nach *#include*-Anweisungen wie

```
#include <experimental\filesystem>
```

im Namensbereich

```
std::experimental::filesystem
```

die Filesystem-Erweiterungen zur Verfügung.

Alle globalen Deklarationen, die nicht in einem mit *namespace* definierten Namensbereich enthalten sind, gehören zum sogenannten **globalen Namensbereich**. Namen aus diesem Namensbereich kann man mit dem Operator „::“ ansprechen, auch wenn die globale Deklaration durch eine lokale verdeckt wird.

Beispiel: 

```
int i; // global
int f(int i)
{
    ::i = 17; // das globale i
    return ++i; // das lokale i
}
```

Auf diese Weise lassen sich in einem Namensbereich auch globale Funktionen verwenden, die gleich heißen wie Elemente eines Namensbereichs. Die Definition eines Namensbereichs hat große syntaktische Ähnlichkeiten mit einer Klassendefinition. Oft kann man „namespace“ durch „struct“ oder „class“ ersetzen, und erhält dann eine Klassendefinition. Die statischen Elemente der Klasse kann man dann wie die Elemente eines Namensbereichs ansprechen (siehe Abschnitt 8.2.11). Im Unterschied zu einer Klasse ist ein Namensbereich aber kein Datentyp. Deshalb kann man mit einer Klasse Variablen (Objekte) definieren, aber nicht mit einem Namensbereich.

## 9.2 Die Verwendung von Namen aus Namensbereichen

Die Verwendung eines Namens aus einem Namensbereich ist etwas unbequem, wenn man immer zusätzlich noch den Namen des Namensbereichs und :: angeben muss. Oft benötigt man in einer Funktion oder in einem Namensbereich nur Elemente aus ganz bestimmten Namensbereichen. Dann kann man diese mit einer *using*-Deklaration oder einer *using*-Direktive angeben. Falls es dann keine Namenskonflikte gibt, kann man die Elemente anschließend allein über ihren Namen ansprechen.

Eine ***using*-Deklaration** kann in einem Namensbereich oder Block angegeben werden. Sie besteht aus dem Schlüsselwort *using* und einem Namen aus einem Namensbereich:

```
using-declaration:
    using nested-name-specifier unqualified-id ;
```

Dieser Name kann dann in dem Namensbereich oder Block, der die *using*-Deklaration enthält, ohne weitere Qualifizierung mit dem Namensbereich und dem Bereichsoperator :: verwendet werden. Wenn das der Name einer Funktion mit überladenen Varianten ist, stehen nach der *using*-Deklaration alle überladenen Varianten zur Verfügung.

Beispiel: Mit dem Namensbereich

```
namespace N {
    int f(int x) { return x + 1; }
    int f(int x, int y) { return x + y; }
}
```

können die Funktionen f folgendermaßen aufgerufen werden:

```
void h()
{
    using N::f;
    int x = f(1);
    int y = f(1, 2);
}
```

Die mit einer *using*-Deklaration in einen Bereich eingeführten Namen dürfen nicht mit anderen Deklarationen kollidieren.

Beispiel: Mit dem Namensbereich N aus dem letzten Beispiel erhält man eine Fehlermeldung:

```
void h()
{
    int f;
    using N::f; // Fehler: mehrfache Deklaration von "N::f"
}
```

Wird ein Name aus einem Namensbereich nach einer *using*-Deklaration verwendet, werden nur die Elemente des Namensbereichs berücksichtigt, die zum Zeitpunkt der *using*-Deklaration im Namensbereich enthalten sind.

Beispiel: Nach

```
namespace N {
    void f(int) {};
}

using N::f;

namespace N {
    void f(std::string s) {};
}
```

ist mit dem Namen f kein Aufruf der Funktion mit dem *string*-Parameter möglich:

```
void h()
{
    f(""); // Fehler: Konvertierung von Argument in "int"
           nicht möglich
}
```

Gibt man aber *using N::f* nach der Definition von *f(string s)* an, kann diese Funktion aufgerufen werden:

```
void g()
{
    using N::f;
    f(""); // Aufruf von f(string)
}
```

Mit einer **using-Direktive**

*using-directive:*

```
using namespace nested-name-specifieropt namespace-name ;
```

kann man alle Namen aus einem Namensbereich so verwenden, als ob sie im nächsten umgebenden Namensbereich enthalten wären, der sowohl die *using*-Direktive als auch den *namespace-name* enthält. Dieser nächste umgebende Namensbereich ist oft der globale Namensbereich.

Beispiel: Der nächste umgebende Namensbereich, der sowohl den global definierten Namensbereich N

```
namespace N {
    int i;
}
```

als auch die *using*-Direktive der globalen Funktion h enthält, ist der globale Namensbereich. Deshalb steht die Variable *N::i* in h wie eine globale Variable unter dem Namen i zur Verfügung:

```
void h()
{
    using namespace N;
    i = 17;
}
```

Eine gleichnamige lokale Variable kann man bis zur *using*-Direktive unter ihrem Namen verwenden:

```
void h()
{
    string i;
    i = "ein string";
    using namespace N;
    i = 17;
}
```

*using*-Direktiven und *using*-Deklarationen können in einem Namensbereich oder in einer Funktion, aber nicht in einer Klasse, angegeben werden.

Beispiel: Der Name *vector* und die Namen aus *N* können im ganzen Namensbereich *M*

```
namespace M {
    using namespace N;
    using std::vector;
```

bzw. in der Funktion *f* verwendet werden:

```
void f()
{
    using namespace N;
    using std::vector;
```

In einer Klasse führen diese Anweisungen zu einer Fehlermeldung des Compilers:

```
class C
{
    using namespace N; // Fehler
    using std::vector; // Fehler
```

Wenn man an mehreren Stellen immer wieder dieselbe Gruppe von Deklarationen aus einem Namensbereich braucht, kann man diese in einem eigenen Namensbereich zusammenfassen und dann diesen mit einer *using*-Direktive verwenden:

```
namespace M1 {
    using N::f;
    using N::g;
}

void h()
{
    using namespace M1;
    f(1); // N::f(1)
    g(2); // N::g(1)
}
```

### 9.3 Header-Dateien und Namensbereiche

Grundsätzlich sollten alle *#include*-Anweisungen vor allen anderen Anweisungen stehen. Eine Missachtung dieser Empfehlung kann in Verbindung mit namespaces überraschende Auswirkungen haben. Dass solche unangenehmen Überraschungen mit Modulen (siehe Abschnitt 2.14) nicht eintreten können, ist ein weiterer Grund, Module anstelle von *#include*-Anweisungen zu verwenden.

1. Ein Namensbereich sollte keine *#include*-Anweisungen enthalten.

Nimmt man eine Header-Datei mit Definitionen, die nicht in Include-Guards (siehe Abschnitt 2.11.3) enthalten sind

```
// Datei: Header_ohne_Include_Guard.h
int i = 0; // eine Variablendefinition
int plus1(int n) { return n + 1; } // eine Funktionsdefinition
```

einmal außerhalb und einmal innerhalb eines Namensbereichs mit einer `#include`-Anweisung auf,

```
#include "Header_ohne_Include_Guard.h"
namespace N
{
#include "Header_ohne_Include_Guard.h"
}
```

werden zwei verschiedene Variablen  $i$  und  $N::i$  sowie zwei verschiedene Funktionen  $plus1$  und  $N::plus1$  definiert. Das ist meist nicht beabsichtigt und führt bei den Variablen leicht zu Verwechslungen und Fehlern. Die doppelt definierten Funktionen haben denselben Anweisungsteil, ohne dass auf die Speicherverschwendung hingewiesen wird.

Wenn die Header-Datei dagegen Include-Guards hat,

```
// Datei: Header_mit_Include_Guard.h
#ifndef HEADER_MIT_INCLUDE_GUARD_H
#define HEADER_MIT_INCLUDE_GUARD_H
int i = 0; // eine Variablendefinition
int plus1(int n) { return n + 1; } // eine Funktionsdefinition
#endif
```

wird durch das doppelte `#include` nur eine Variable definiert (die aus der ersten `#include`-Anweisung).

```
#include "Header_mit_Include_Guard.h"
namespace N
{
#include "Header_mit_Include_Guard.h"
}
```

Falls die Header-Datei Funktionsdeklarationen (ohne Block) enthält, die in einer cpp-Datei oder einer obj-Datei definiert werden, erhält man für jede solche Funktion  $f$  eine Fehlermeldung der Art: „ $N::f$  nicht gefunden“, da der Linker zur Deklaration  $N::plus1$  keine Definition findet:

```
namespace N
{
#include <vector> // über 100 Fehlermeldungen
}
```



Die Anforderung, dass ein Namensbereich keine *#include*-Anweisungen enthält, wird durch erreicht, dass alle *#include*-Anweisungen vor allen anderen Anweisungen (also auch *namespace*-Deklarationen) stehen.

## 2. Header-Dateien sollten keine globalen *using*-Direktiven enthalten.

Header-Dateien werden mit *#include* in andere Header- und cpp-Dateien aufgenommen. Wenn eine Header-Datei dann eine *using*-Direktive oder -Deklaration enthält, ist diese auch in jeder Datei enthalten, die den Header mit einer *#include*-Anweisung aufnimmt. Damit sind dann in dieser Datei alle Namen verfügbar, ohne dass das explizit erkennbar wird.

Das kann überraschende Folgen haben. Das nächste Beispiel zeigt, wie sich so die Reihenfolge von *#include*-Anweisungen auf ein Ergebnis auswirken kann.

Beispiel: Nimmt man die beiden Header-Dateien

```
// Datei: Header_1.h
int f(double) { return 1; } // f(int) wäre mehrdeutig

namespace N
{ // normalerweise stehen hier noch mehr Definitionen.
  // Dann ist der Effekt aber nicht so offensichtlich.
  int f(int) { return 2; }
}

int g() { return f(1); }
```

und

```
// Datei: Header_2.h
namespace N
{ // normalerweise stehen hier noch mehr Definitionen.
  // Dann ist der Effekt aber nicht so offensichtlich.
}

using namespace N;
```

in dieser Reihenfolge auf

```
#include "Header_1.h"
#include "Header_2.h"
int x = g(); // x=1
```

erhält x den Wert 1. Vertauscht man die Reihenfolge der *#include*-Anweisungen, erhält man dagegen den Wert 2:

```
#include "Header_2.h"
#include "Header_1.h"
int x = g(); // x=2
```

### 3. Ausnahmen für die Standardbibliothek und *using namespace std*

Die konsequente Umsetzung der Empfehlung aus 2. hätte zur Folge, dass man kein *using namespace std* verwenden darf. Dann müsste man aber bei allen Parametern mit Datentypen aus der Standardbibliothek *std::* dazuschreiben. Das kann umständlich werden und die Lesbarkeit beeinträchtigen.

Beispiel: Ohne ein

```
using namespace std; // oder using std::vector
```

muss man bei jedem Parameter einer Funktion *std::* angeben

```
#include <vector>
void showData(std::vector<int> v); // ok
```

Die [C++ Core Guidelines](#) lassen deshalb *using*-Direktiven ausdrücklich zu, wenn dabei keine Gefahr von Namenskonflikten entsteht. Diese Gefahr ist bei der Standardbibliothek gering. Sie kann weiter reduziert werden, wenn man die *using*-Direktiven und -Deklarationen in einen Namensbereich oder lokal in eine Funktion aufnimmt.

Beispiel: Falls viele Klassen der Standardbibliothek

```
// Datei: Header_3.h
#include <string>
#include <vector>
#include <iostream>
#include <memory>
#include <algorithm>
```

und die globale *using*-Direktive

```
using namespace std;
```

verwendet werden, sind alle diese Klassen auch in jeder Datei verfügbar, die ein

```
#include "Header_3.h"
```

enthält. Grundsätzlich ist es aber übersichtlicher, wenn man in einem Namensbereich arbeitet. Dann kann man diese in diesen Namensbereich aufnehmen und dadurch unterbinden, dass die Namen in anderen Header-Dateien verfügbar sind:

```
#include <string>
// usw.
namespace MeinNamensbereich
{
    using namespace std; // oder using std::vector;
```

Lokale *using*-Direktiven und -Deklarationen schränken Namenskonflikte noch mehr ein:

```
int MeineFunktion()
{
    using namespace std; // oder using std::vector;
}
```

## 9.4 Aliasnamen für Namensbereiche $\Theta$

Je kürzer die Namen von Namensbereichen sind, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein anderer Namensbereich denselben Namen hat. Das kann Namenskonflikte zur Folge haben. Deshalb empfiehlt es sich, für Namensbereiche möglichst lange und aussagekräftige Namen zu wählen. Allerdings ist die Verwendung von langen Namen recht umständlich.

Einen Ausweg aus diesem Dilemma bieten **Aliasnamen** für einen Namensbereich. Ein solcher Aliasname deklariert ein Synonym für einen Namensbereich. Unter dem Aliasnamen kann man dann die Elemente des Namensbereichs wie unter dem eigentlichen Namen ansprechen.

*namespace identifier = qualified-namespace-specifier ;*

Beispiel: Die Elemente von

```
namespace Meine_Superbibliothek
{
    void f(int i) { /* ... */ }
    namespace Datenbankfunktionen
    {
        void g(int i) { /* ... */ }
    }
}
```

kann man nach

```
namespace S = Meine_Superbibliothek;
namespace DB = Meine_Superbibliothek::Datenbankfunktionen;
```

mit den kurzen Namen ansprechen:

```
S::f(17);
DB::g(17);
```

Mit Aliasnamen kann man auch leicht eine Version einer Bibliothek durch eine andere ersetzen:

```
namespace S = Meine_Superbibliothek_Version_2;
```

Aliasnamen können auch in einer Klasse definiert werden:

```
class C {
    using vs=std::vector<int>;
    void show(vs v) {};
};
```

## 9.5 inline namespaces Θ

Ein inline-namespace wird zusätzlich mit dem Wort *inline* definiert. Die Elemente eines inline-namespace können wie die Elemente des umgebenden Namensbereichs verwendet werden.

Beispiel: Die Klasse C aus dem inline namespace *Version\_1*

```
namespace N
{
    inline namespace Version_1
    {
        class C {};
    }
}
```

kann genauso verwendet werden, wie wenn sie im Namensbereich N definiert worden wäre:

```
void test()
{
    using namespace N;
    C c;
    N::C d;
    N::Version_1::C e; // das geht auch
}
```

Hier stellt sich natürlich sofort die Frage, wieso man dann C nicht gleich direkt in N definiert. Eine Anwendung ergibt sich daraus, wenn man die Klasse C aktualisieren will. Dann entfernt man das *inline* von der alten Version und definiert die neue Version in einem neuen *inline* namespace.

Im Unterschied zur Verwendung von Alias-Namen muss der Anwender der Klasse nichts ändern und bekommt trotzdem die neue Klasse.

### Aufgaben 9.5

1. Definieren Sie eine Funktion f in einem Namensbereich N und rufen Sie diese

a) mit dem Namen des Namensbereichs, dem Bereichsoperator und ihrem Namen auf.

- b) nach einer *using*-Direktive auf.
  - c) nach einer *using*-Deklaration auf
  - d) Definieren Sie im Namensbereich N einen verschachtelten Namensbereich N1. N1 soll eine Klasse C mit den Deklarationen (Prototypen) von drei Funktion g, h und i enthalten.
  - e) Definieren Sie die Funktion g aus C in einem getrennten Namensbereich.
  - f) Definieren Sie die Funktion i aus C außerhalb eines Namensbereichs mit einem namespace-Alias.
2. Ein Kollege berichtet von Fehlern beim Kompilieren: Wenn er die beiden *#include*-Anweisungen in dieser Reihenfolge angibt,

```
#include "include-2.h" // beide global, nicht in einem  
#include "include-1.h" // Namensbereich
```

erhält er eine Fülle von undurchsichtigen Fehlermeldungen. Gibt er sie dagegen in der umgekehrten Reihenfolge an, wird das Programm ohne Fehler kompiliert:

```
#include "include-1.h"  
#include "include-2.h"
```

Was kann die Ursache sein?

## 10 Exception-Handling

Die üblichen Kontrollstrukturen (*if*, *while* usw.) sind für die Steuerung eines normalen Programmablaufs angemessen und ausreichend. Sie führen allerdings schnell zu unübersichtlichen Programmstrukturen, wenn man damit Fehler abfangen will.

**Fehler** sind in diesem Zusammenhang oft Funktionsaufrufe mit Argumenten, mit denen die Funktion ihre **Aufgabe** (Spezifikation) **nicht erfüllen** kann. Solche Fehler lassen sich zwar durch eine Prüfung der Argumente vor dem Aufruf vermeiden. In der Praxis ist das aber nicht immer einfach.

Beispiel: Der Aufruf einer Quadratwurzel-Funktion führt mit Argumenten  $<0$  zu einem Fehler. Diese Bedingung kann man vor dem Aufruf einfach prüfen.  
Bei einer Funktion, die einen String in eine Zahl umwandeln soll, muss das Argument eine Zahl darstellen. Eine solche Prüfung ist fast genau so aufwendig wie die Konvertierung.

Falls eine Funktion ihre Aufgabe nicht erfüllen kann, informiert sie den Aufrufer darüber traditionellerweise (z.B. in C) durch einen speziellen Rückgabewert oder indem sie eine Statusvariable (error flag) setzt. Diese Techniken haben aber Schwächen:

- Niemand kann den Aufrufer zwingen, den Rückgabewert oder die Fehler-flags zu prüfen. Deshalb können Fehler übersehen werden.

Beispiel: Nur wenige Programmierer prüfen den Wert von *errno* nach dem Aufruf einer Funktion aus *math.h* (wie z.B. *sqrt*).

- In komplizierten Programmen, in denen viele Fehler vorkommen können, kann die Prüfung aller möglichen Fehler sehr aufwendig werden und zu tief verschachtelten *if*-Anweisungen führen.

Beispiel: Viele Funktionen aus den C-Bibliotheken setzen eine globale Variable *errno* auf einen von Null verschiedenen Wert, um anzuzeigen, dass ein Fehler aufgetreten ist. Oft will man mehrere solche Funktionen *f1*, *f2* usw. nacheinander aufrufen, aber nur dann, wenn beim Aufruf zuvor kein Fehler aufgetreten ist. Das führt dann zu einer Programmstruktur wie

```
errno = 0;
f1(); // setzt bei einem Fehler errno auf != 0
if (errno != 0) cout << "Fehler in f1" << endl;
```

```

else
{
    f2(); // setzt bei einem Fehler errno auf != 0
    if (errno != 0) cout << "Fehler in f2" << endl;
    else
    {
        f3(); // setzt bei einem Fehler errno auf != 0
        if (errno != 0) cout << "Fehler in f3" << endl;
    }
}

```

Dadurch wird das Programm, in dem eigentlich nur drei Anweisungen ausgeführt werden sollen, beträchtlich **aufgeblasen** (auf 13 Zeilen). In der Praxis entstehen oft noch wesentlich tiefer verschachtelte Strukturen, bei denen man dann vor lauter Sicherungsmechanismen kaum noch sieht, was eigentlich gemacht wird. Dabei besteht die Gefahr, dass sich **neue Fehler** in das Programm **einschleichen**.

Kurzum: **Es ist gar nicht so einfach, fehlerfreie Programme zu schreiben.**

Wenn man Fehler aber schon nicht mit 100%iger Sicherheit vermeiden kann, sollte man wenigstens versuchen, dass der Umgang mit ihnen nicht zu unübersichtlichen Programmen führt. Das ist mit **Exceptions** möglich, die oft eine Alternative zu error-flags und speziellen Rückgabewerten sind, ohne deren Schwächen zu haben:

- Mit Exceptions kann man die Anweisungen zur Reaktion auf einen Fehler zusammenfassen und von den eigentlich auszuführenden Anweisungen trennen. Dadurch lassen sich so unübersichtliche Programmstrukturen wie im Beispiel oben vermeiden.
- Exceptions können mehr Informationen weitergeben als *return*-Werte.
- Exceptions können nicht übersehen werden. Wenn man auf eine Exception nicht reagiert, ist ein Programmabbruch die Folge.

Das Wort „Exception“ kann man mit „Ausnahme“ übersetzen. Es steht für Ereignisse, die normalerweise nicht vorkommen und die deshalb Ausnahmen vom Regelfall sind. Häufig sind das Laufzeitfehler wie eine Division durch Null, eine Bereichsüberschreitung, eine allgemeine Schutzverletzung usw.

## 10.1 Die *try*-Anweisung

Eine ***try-Anweisung*** (*try*-Block) besteht aus dem Schlüsselwort *try* und einer Verbundanweisung, auf die ein oder mehrere Exception-Handler (*handler*) folgen:

*try-block:*

```
try compound-statement handler-seq
```

*handler-seq:*

```
handler handler-seqopt
```

*handler:*

`catch ( exception-declaration ) compound-statement`

*exception-declaration:*

`type-specifier-seq declarator`

`type-specifier-seq abstract-declaratoropt`

...

Bei der Ausführung der *try*-Anweisung werden die Anweisungen aus der Verbundanweisung nach *try* der Reihe nach abgearbeitet. Falls dabei keine Exception ausgelöst wird, werden die Exception-Handler übergangen. Der Programmablauf ist dann derselbe, wie wenn die Anweisungen nicht in einem *try*-Block enthalten sind.

Löst jedoch eine dieser Anweisungen eine Exception aus, werden unmittelbar nach der Exception die Exception-Handler der Reihe nach daraufhin geprüft, ob die Exception zu ihnen passt. Beim ersten passenden Handler wird dann die Verbundanweisung nach *catch* ausgeführt. Damit ist die Ausführung der gesamten *try*-Anweisung beendet. Sowohl die Anweisungen, die in der *try*-Anweisung auf die Exception folgen, werden übergangen, als auch alle weiteren Handler.

Die allgemeinste (aber auch undifferenzierteste) Form einer Exception-Deklaration ist „...“. Gibt man diese nach *catch* an, passt der Handler zu jeder Exception.

Die meisten Funktionen der Standardbibliothek von C++ (aber nicht die der Standardbibliothek von C, also z.B. die aus `<math.h>` oder `<cmath>`) lösen bei **Laufzeitfehlern eine Exception** aus. Wenn man solche Anweisungen in einem *try*-Block ausführt, kann man in einem Exception-Handler darauf reagieren. Ohne Exception-Handling führen solche Laufzeitfehler in Standard-C++ zu einem Programmabbruch.

Es gibt aber auch Ausnahmen:

- Da die Programmiersprache C keine Exceptions kennt, lösen die Funktionen aus den **C-Bibliotheken** keine Exceptions aus. Zum Beispiel löst *sqrt* (aus `<math.h>` bzw. `<cmath>`) mit einem negativen Argument keine Exception aus.
- Fehler bei **Gleitkommaoperationen** führen nicht zu Exceptions, sondern zu Ergebnissen, die NAN-Werte darstellen.

Beispiel: Die *insert*-Funktion von *std::string* löst eine Exception aus, wenn man an einer nicht vorhandenen Position (z.B. der Position 1 in einem leeren String) Zeichen einfügen möchte:

```
string s;
try { s.insert(1, "abc"); } // füge "abc" an Pos. 1
catch (...)               // ein
{
    cout << "da ging was schief" << endl;
}
```

Ruft man



```
s.insert(1, "abc");
```

nicht in einem *try*-Block aus, hat das einen Programmabbruch zur Folge.

Mit Exception-Handling lässt sich das Problem, ein Programm bei einem Fehler abzubrechen und nur dann weiterzumachen, wenn vorher alles gut ging, einfacher als mit speziellen Rückgabewerten (siehe Seite 555) lösen.

Beispiel: Wenn die Funktionen *f1*, *f2* und *f3* bei jedem Fehler eine Exception auslösen (siehe Abschnitt 10.3), erhält man durch

```
try {
    f1();
    f2();
    f3();
}
catch (...) // passt zu jeder Exception
{
    cout << "Fehler ..." << endl;
}
```

ein übersichtlicheres Programm wie auf Seite 555, mit im Wesentlichen (bis auf die unterschiedlichen Meldungen) demselben Programmablauf.

Falls die Anweisung, die eine Exception auslöst, nicht unmittelbar in einem *try*-Block enthalten ist oder der *try*-Block **keinen passenden Exception-Handler** hat, werden die Exception-Handler einer **umgebenden *try*-Anweisung** geprüft. Das können *try*-Anweisungen in einem umgebenden Block sein oder in einer Funktion, die die auslösende Anweisung aufgerufen hat. Diese Suche wird so lange fortgesetzt, bis ein passender Exception-Handler gefunden wird oder bis der Aufruf-Stack komplett durchsucht ist. Im letzten Fall wird die vordefinierte Funktion *terminate* aufgerufen, die das Programm abbricht. Diese Suche nach einem Exception-Handler in einer aufrufenden Funktion wird auch als „stack unwinding“ bezeichnet.

Beispiel: Beim Aufruf der Funktion *f* wird eine Exception ausgelöst:

```
string f()
{
    string s;
    return s.insert(1, "abc");
};
```

Diese wird in der nächsten *try*-Anweisung der Aufrufhierarchie abgefangen:

```
string t()
{
    string s;
    try { s = f(); }
    catch (...) { cout << "da ging was schief" << endl; }
    return s;
};
```

Da eine Exception in dem Handler gelöscht wird, in dem sie abgefangen wird, ist sie in höheren Stufen der Aufrufhierarchie nicht mehr vorhanden. Deshalb führt ein Aufruf der Funktion `u` zur Meldung „da ging was schief“ und nicht zu der „uhuhuhu“:

```
string u()
{
    try { return t(); }
    catch (...) { cout << "uhuhuhu" << endl; }
}
```

In einem Exception-Handler kann man in den Klammern nach *catch* (der *exception-declaration*) einen Datentyp angeben. Dann **passt** dieser **Exception-Handler** nur zu einer Exception, die diesen Datentyp hat oder einen davon abgeleiteten. Das beruht darauf, dass jede Exception einen **Datentyp** hat. Dieser wird später im Zusammenhang mit *throw* (siehe Abschnitt 10.3) beschrieben. Üblicherweise gibt man den Datentyp im Exception-Handler als Referenztyp an.

Wenn ein **passender Exception-Handler** gefunden wird, werden seine Anweisungen ausgeführt. Mit dem Verlassen des Exception-Handlers wird die Exception gelöscht.

Eine *try*-Anweisung kann **mehrere Exception-Handler** haben. Deshalb kann man auf verschiedene Exceptions differenziert reagieren.

Beispiel: Wenn die Funktionen `f1`, `f2` usw. Exceptions der Typen *exception1*, *exception2* usw. auslösen, erreicht man mit der folgenden Programmstruktur denselben Effekt wie im Beispiel auf Seite 555. Diese ist offensichtlich einfacher und übersichtlicher:

```
try {
    f1();
    f2();
    f3();
}
catch (exception1&) { cout << "Fehler in f1" << endl; }
catch (exception2&) { cout << "Fehler in f2" << endl; }
catch (exception3&) { cout << "Fehler in f3" << endl; }
```

Allerdings sollten Exceptions normalerweise nicht auf die Funktion hinweisen, in der sie ausgelöst wurden, sondern auf die Ursache eines Fehlers.

Der Programmablauf nach einer Exception unterscheidet sich grundlegend von dem bei den üblichen Kontrollstrukturen: Wenn eine Exception auftritt, springt das Programm sowohl über Blockgrenzen als auch über Funktionsaufrufe hinweg in den Exception-Handler der nächsten passenden *try*-Anweisung. Auf diese Weise kann man Fehler, die an verschiedenen Stellen in einem Programm auftreten, an einer zentralen Stelle behandeln.

In den Klammern nach *catch* kann man nach dem Datentyp auch noch einen Bezeichner angeben. Dieser ist dann der Name einer **Variablen** des Exception-Typs. Die Variable enthält üblicherweise Informationen über die Ursache der Exception. In der nach

```
#include <exception> // oder import std.core; (siehe Abschnitt 2.13)
```

verfügbaren Klasse *exception* der Standardbibliothek stehen solche Informationen über die Funktion

```
virtual const char* what() const noexcept;
```

als Text zur Verfügung.

Beispiel: In Visual C++ wird hier die Meldung „invalid string position“ ausgegeben:

```
string s;
try { s.insert(1, "xyz"); }
catch (std::exception& e)
{
    cout << e.what() << endl;
}
```

In älteren C++-Compilern war Exception-Handling mit längeren Laufzeiten verbunden. Diese Nachteile konnten aber in den letzten Jahren weitgehend eliminiert werden. Die nächste Tabelle enthält die Ausführungszeiten für die Anweisungen unter 1., 2. und 3.

- 1. 

```
for (int i = 0; i < n; i++)
    sum = sum + i;
```
- 2. 

```
try {
    for (int i = 0; i < n; i++)
        sum = sum + i;
}
catch (...) {}
```
- 3. 

```
for (int i = 0; i < n; i++)
{
    try {
        sum = sum + i;
    }
    catch (...) {}
}
```

| Benchmarks Visual Studio, Laufzeit in Millisekunden |       |       |        |
|-----------------------------------------------------|-------|-------|--------|
| n=100 000 000                                       | 1.    | 2.    | 3.     |
| Visual C++ 2010, Release 32Bit /O2                  | 25 ms | 40 ms | 175 ms |
| Visual C++ 2019.5, Release x86 /O2                  | 23 ms | 23 ms | 60 ms  |
| Visual C++ 2019.5, Release x64 /O2                  | 20 ms | 20 ms | 30 ms  |

Neben der *try*-Anweisung von Standard-C++ steht in Visual C++ auch noch das sogenannte strukturierte Exception-Handling mit *\_\_try-\_\_except* und *\_\_finally* zur Verfügung. Dabei handelt es sich um eine Microsoft-Erweiterung der Programmiersprache C, die in C eine ähnliche Fehlerbehandlung wie in C++ ermöglichen soll. Da es in C keine Klassen gibt, unterscheidet sich dieses Exception-Handling stark von dem mit *try*, *throw* und *catch*. Microsoft rät von der Verwendung von *\_\_try* usw. in einem C++-Programm ab und empfiehlt, das Exception-Handling mit *try-catch* zu bevorzugen.

## 10.2 Exception-Handler und Exceptions der Standardbibliothek

Die folgenden Beispiele zeigen den Datentyp einiger Exceptions der Standardbibliothek sowie passende Exception-Handler. Alle diese Exceptions sind nach

```
#include <stdexcept> // oder import std.core; (siehe Abschnitt 2.13)
```

im Namensbereich *std* verfügbar und von der Klasse *exception* der Standardbibliothek abgeleitet.

1. Wenn man in einen Container der Standardbibliothek (dazu gehören in diesem Zusammenhang auch Strings) an einer nicht vorhandenen Position ein Element einfügt oder löscht, wird eine Exception des Typs *std::out\_of\_range* ausgelöst

```
string s; // s ist ein leerer String
try { s.insert(1, "abc"); } // Exception: std::out_of_range
catch (std::out_of_range& e)
{
    cout << e.what() << endl; // „invalid string position“
}
```

2. Wenn man bei einem Container mit der Funktion *at* eine nicht vorhandene Position anspricht, wird ebenfalls eine Exception des Typs *std::out\_of\_range* ausgelöst:

```
vector<double> v; // v ist ein leerer Vektor
try { v.at(1) = 17; } // Exception: std::out_of_range
catch (std::out_of_range& e)
{
    cout << e.what() << endl;
}
```

Verwendet man dagegen den Indexoperator, wird keine Exception ausgelöst:

```
v[1] = 17; // Zugriffsverletzung
```

Das hat eine Zugriffsverletzung zur Folge, falls dabei nicht reservierte Speicherbereiche angesprochen werden.



```

string s; // s ist ein leerer String
try { s.insert(1, "abc"); } //Exception: out_of_range
catch (range_error&)
{
    cout << "range error" << endl;
}
catch (exception&)
{
    cout << "exception" << endl;
}
catch (...)
{
    cout << "Was war das?" << endl;
}

```

Da die Exception-Handler in der aufgeführten **Reihenfolge** geprüft werden, sollten die spezielleren vor den allgemeineren Handlern stehen. Wird diese Reihenfolge nicht eingehalten, wird die Exception durch den Handler für die allgemeinere Exception behandelt und gelöscht, ohne dass der Handler für die speziellere Exception jemals erreicht werden kann. Ein Handler mit der Exception-Deklaration „...“ muss deshalb immer der letzte sein, da er alle Exceptions behandelt. Der Compiler weist durch eine Warnung wie „exception wurde aufgefangen durch Basisklasse“ darauf hin, wenn diese Reihenfolge nicht eingehalten wird.

Beispiel: In der ersten *try*-Anweisung wird die Anweisung nach *length\_error* nie erreicht, da eine Exception schon durch den übergeordneten Handler mit dem Datentyp *logic\_error* abgefangen wird:

```

try { ... } // falsch
catch (logic_error&) // fängt auch length_error
{
    cout << "logisch" << endl;
}
catch (length_error&) // wird nie erreicht
{ // warning: "std::length_error&" wurde aufgefangen durch
    cout << "Mich kriegt keiner" << endl; // Basisklasse
}

```

In der nächsten *try*-Anweisung wird ein *length\_error* vom ersten Handler abgefangen. Ein *logic\_error*, der kein *length\_error* ist, wird vom zweiten, und alle anderen werden vom letzten abgefangen.

```

try { ... } // richtig
catch (length_error&)
{
    cout << "Längenfehler" << endl;
}
catch (logic_error&)
{
    cout << "logic, aber nicht length" << endl;
}

```

```

catch (...)
{
    cout << "alles andere" << endl;
}

```

Alle von `std::exception` abgeleiteten Exception-Klassen der Standardbibliothek haben wie

```

class runtime_error : public exception {
public:
    explicit runtime_error(const string& Message):
        exception(Message.c_str()) {}
    explicit runtime_error(const char* Message):exception(Message) {}
};

```

zwei Konstruktoren und keine weiteren Elemente. Sie erben alle von der Basisklasse `exception` die Elementfunktion *what*, die in Abschnitt 10.3 beschrieben wird. Deswegen kann ein Programm nur diese Funktion verwenden, wenn es portabel sein soll.

### 10.3 *throw*-Ausdrücke und selbst definierte Exceptions

Eine Exception wird immer durch einen **throw-Ausdruck** ausgelöst. Es gibt keine andere Möglichkeit, eine Exception auszulösen. Da die Anweisungen in einem Exception-Handler nur ausgeführt werden, nachdem eine dazu passende Exception ausgelöst wurde, kann man diese nur über einen *throw*-Ausdruck erreichen.

*throw-expression:*  
`throw assignment-expression opt`

Da C++ hier das Schlüsselwort „throw“ verwendet, sagt man anstatt „eine Exception auslösen“ oft auch „eine Exception werfen“.

Mit einem Ausdruck *x* wird bei der Ausführung von

```
throw x;
```

eine temporäre Variable des Datentyps von *x* erzeugt und mit dem Wert von *x* initialisiert. Sie existiert bis zur Abarbeitung eines passenden Exception-Handlers, falls sie nicht mit „throw;“ weitergegeben wird und in diesem Fall weiterhin existiert.

Durch das Auslösen einer Exception wird der aktuelle Block verlassen. Dabei wird der Speicherplatz aller in diesem Block definierten nicht statischen Variablen wieder freigegeben. Für Variable, deren Datentyp eine Klasse ist, wird ihr **Destruktor** aufgerufen (siehe Abschnitt 8.1.5). Als **nächste Anweisung** wird dann der erste passende Exception-Handler der *try*-Anweisung ausgeführt, die in der Aufrufhierarchie als letzte begonnen und noch nicht beendet wurde.

Beispiel: Der *throw*-Ausdruck in der Funktion *f* löst eine Exception des Datentyps *int* aus. Die dabei erzeugte Variable hat den Wert 1 und existiert auch noch nach dem

Verlassen des Blocks, der zur Funktion `f` gehört. Der Speicherplatz für die lokale Variable `x` wird mit dem Verlassen des Blocks wieder freigegeben:

```
void f()
{
    int x = 1;
    throw x;
}
```

Die in einem `throw`-Ausdruck erzeugte temporäre Variable kann man in einem Exception-Handler verwenden, wenn man in der Exception-Deklaration nach dem Datentyp einen Bezeichner angibt. Dieser ist dann der Name einer **Variablen dieses Datentyps**, die mit dem Wert der temporären Variablen initialisiert wird. Diese Initialisierung ist deshalb möglich, weil ein Exception-Handler nur dann zu einer Exception passt, wenn er denselben Datentyp hat oder eine Basisklasse davon ist. Die Variable erhält so den Wert des bei `throw` angegebenen Ausdrucks.

Auf diese Weise können **Informationen** von der Stelle, an der die Exception ausgelöst wird, an den Exception-Handler **übergeben** werden. Das sind oft Informationen über die Ursache der Exception. Da eine Exception-Klasse beliebige Informationen enthalten kann, können damit mehr Informationen weitergegeben werden als z.B. mit einem Fehlercode des Datentyps `int` als Rückgabewert.

Beispiele:

1. Die Ausdrücke nach `throw` in der Funktion `f` passen in der aufgeführten Reihenfolge zu den Exception-Handletern in `g` und initialisieren dort die jeweiligen Variablen:

```
void f(int i)
{
    if (i == 1) throw string("Hallo"); // Datentyp string
    if (i == 2) throw 1.7;           // Datentyp double
    if (i == 3) throw 17;            // Datentyp int
    if (i == 4) throw "char*";      // Datentyp char*
}

void g(int i)
{
    try { f(i); }
    catch (string s) { cout << s << endl; } // s="Hallo"
    catch (double d) { cout << d << endl; } // 1.7
    catch (int i)    { cout << i << endl; } // 17
    catch (char* s)  { cout << s << endl; } // char*
}
```

Dieses Beispiel soll lediglich zeigen, wie Daten vom `throw`-Ausdruck an den Exception-Handler übergeben werden. Diese Übergabe unterscheidet sich grundlegend von den üblichen Techniken, mit denen Daten aus einer Funktion über einen Rückgabewert oder Referenzparameter zurückgegeben werden.



- Die von `std::exception` abgeleiteten Klassen der Standardbibliothek haben Konstruktoren, denen man einen *string* übergeben kann. Dieser String wird dann von der Elementfunktion *what* zurückgegeben, die von *exception* geerbt wird:

```
try { throw std::runtime_error("mein Fehler"); }
catch (const std::runtime_error& e)
{
    cout << e.what() << endl; // mein Fehler
}
```

- Da eine Funktion mit der Ausführung von *throw* verlassen wird, muss in einem Zweig, der mit *throw* verlassen wird, kein Wert zurückgegeben werden.
- Gelegentlich findet man Konstruktionen, bei denen eine Exception in einem *try*-Block ausgelöst und im direkt zugehörigen Exception-Handler abgefangen wird wie in

```
try { if (Fehler) throw runtime_error("mein Fehler"); }
catch (exception& e)
{
    cout << e.what() << endl;
}
```

Solche Konstruktionen sind unnötig umständlich: Mit einer einfachen *if*-Anweisung erhält man denselben Effekt:

```
if (Fehler)
    cout << "mein Fehler" << endl;
```

Normalerweise enthält die Anweisung nach *try* Funktionsaufrufe, die Exceptions auslösen können. Wenn in den folgenden Beispielen trotzdem solche Konstruktionen verwendet werden, dann nur, um zu zeigen, wie eine Exception zu einem Exception-Handler passt.

Ein *throw* informiert wie ein *return* über das Ergebnis eines Funktionsaufrufs. Die wichtigsten Unterschiede zwischen *throw* und *return* sind:

- Mit *return* gibt man bei einem erfolgreichen Aufruf das Ergebnis zurück.
- Mit *throw* Informationen gibt man dagegen bei einem Fehler über den Fehler zurück.
- Der von *return* zurückgegebene Wert muss zum Rückgabtyp der Funktion passen. Mit *throw* kann man dagegen einen Wert eines beliebigen Datentyps zurückgeben.
- Nach *return* wird die nächste Anweisung ausgeführt, die auf den Funktionsaufruf folgt. Nach *throw* wird der nächste passende Exception-Handler ausgeführt.

Für den Ausdruck nach *throw* sollte man immer einen **Ausdruck** wählen, dessen Datentyp eine **Klasse** ist und der durch einen Konstruktor erzeugt wird. Dabei werden oft Klassen verwendet, die nur den Zweck haben, als Exceptions verwendet zu werden. Bei einer bestimmten Fehlerkategorie wird dann eine bestimmte Exception ausgelöst, so dass die Fehlerkategorie über die Exception identifiziert werden kann. In der Standardbibliothek von C++ ist in der Header-Datei `<exception>` die Klasse *exception* definiert:

```

class exception {
public:
    exception() noexcept;
    exception(const exception&) noexcept;
    exception& operator=(const exception&) noexcept;
    virtual ~exception();
    virtual const char* what() const noexcept;
};

```

Diese Klasse ist die **Basisklasse** der schon in Abschnitt 10.2 vorgestellten Exception-Klassen der Standardbibliothek aus der Header-Datei `<stdexcept>`. Alle diese Klassen besitzen wie die Klasse `runtime_error` Konstruktoren, denen man den von der Elementfunktion `what` zurückgegebenen String übergeben kann:

```

class runtime_error : public exception {
public:
    explicit runtime_error(const string& Message):
        exception(Message.c_str()) {}
    explicit runtime_error(const char* Message):exception(Message) {}
};

```

Von der Klasse `std::exception` kann man auch eigene Klassen ableiten. Allerdings wird oft empfohlen, die Basisklasse `std::runtime_error` analog wie bei der vordefinierten Klasse

```

class range_error : public std::runtime_error {
public:
    explicit range_error(const string& _Message) :
        std::runtime_error(_Message.c_str()) {}
    explicit range_error(const char* _Message) :
        std::runtime_error(_Message) {}
};

```

zu verwenden:

```

class MeineException : public std::runtime_error
{
public:
    explicit MeineException(const std::string& msg) noexcept
        :std::runtime_error(msg.c_str()) {}
    explicit MeineException(const char* msg) noexcept
        :std::runtime_error(msg) {}
};

```

Da ein Exception-Handler mit einer Basisklasse auch zu einer Exception einer abgeleiteten Klasse passt, kann man alle abgeleiteten Exceptions über einen Exception-Handler mit der Basisklasse abfangen und so auf alle Exceptions der Hierarchie in einem einzigen Handler reagieren. Wenn man dabei die Variable im Exception-Handler als **Referenz** deklariert und eine **virtuelle Funktion** dieser Variablen aufruft, führt das zum Aufruf der Funktion, die zum **dynamischen Datentyp** (siehe Abschnitt 8.4.1) der Variablen gehört. Das ist der **Datentyp**, der im **throw-Ausdruck** angegeben wurde.

Beispiel: Mit der Funktion

```
void f()
{
    throw MeineException("ich bin's");
}
```

wird durch

```
try { f(); } // (1)
catch (exception& e) // Referenz Basisklasse
{
    cout << e.what() << endl;
} // Aufruf MeineException::what
```

die Meldung „ich bin's“ ausgegeben. Es ist nicht notwendig, für jede Exception einer Hierarchie einen eigenen Handler anzugeben:

```
try { f(); }
catch (MeineException& e) // unnötig umständlich
{
    cout << e.what() << endl;
}
catch (exception& e)
{
    cout << e.what() << endl;
}
```

Wenn man die Variable im Exception-Handler dagegen nicht als **Referenz** definiert, führt das bei einer virtuellen Funktion zum Aufruf der **Funktion**, die zum **statischen Datentyp** (siehe Abschnitt 8.4.1) der Variablen gehört. Das ist der **Datentyp**, der im **Exception-Handler** angegeben wurde.

Beispiel: In der Variante (2) werden immer die als Kommentar angegebenen Funktionen aufgerufen, und zwar auch dann, wenn in *f* eine weitere von *exception* abgeleitete Exception ausgelöst wird.

```
try { f(); } // (2)
catch (MeineException e) // kein Referenztyp
{
    cout << e.what() << endl; // MeineException::what
}
catch (exception e)
{
    cout << e.what() << endl; // exception::what
}
```

Die Variante (2) hat gegenüber (1) den Nachteil, dass zu einer Exception einer abgeleiteten Klasse die Funktion *what* aus einer Basisklasse aufgerufen wird, wenn für diese kein eigener Exception-Handler definiert wird. Da das normalerweise nicht erwünscht ist,

- muss man für jede Exception einer Hierarchie einen eigenen Exception-Handler definieren.
- muss man bei jeder späteren Änderung von *f*, bei der eine weitere Exception ausgelöst wird, die *try*-Anweisung um einen neuen Handler ergänzt werden. Vergisst man das, werden nur die Funktionen des Exception-Handlers der Basisklasse ausgeführt. Diese können aber nicht darüber informieren, dass eine abgeleitete Exception ausgelöst wurde.

Deshalb sollte man als **Datentyp** für die Variable in einem Exception-Handler **immer einen Referenztyp** wählen.

Falls beim Aufruf einer Funktion Exceptions aus **verschiedenen Hierarchien** auftreten können, fängt man diese jeweils in einem eigenen Exception-Handler über die Basisklasse der Hierarchie ab. Falls abgeleitete Klassen in einer solchen Hierarchie weitere Informationen zur Verfügung stellen, fügt man vor jedem Handler der Basisklasse einen weiteren ein, der Exceptions der abgeleiteten Klasse behandelt. Ein letzter ...-Exception-Handler ist vor allem eine Vorsichtsmaßnahme, falls auch noch eine andere Exception auftritt.

Beispiel: Falls beim Aufruf einer Funktion *f* Exceptions der Standardbibliothek und aus einer anderen Klassenhierarchie (hier mit der Basisklasse *exception\_BereichX*) auftreten können, kann man Exception-Handler wie die folgenden verwenden:

```
try {
    f(); // ...
}
catch (exception& e) // C++ Standardbibliothek
{
    cout << e.what() << endl;
}
catch (exception_BereichX& e) // Basisklasse der Exceptions
                               // aus meinem Arbeitsbereich
{
    cout << e.Message << endl;
}
catch (...) // alle weiteren Exceptions
{
    cout << "Was war das?" << endl;
}
```

In den folgenden Funktionen dürfen keine Exceptions ausgelöst werden. Sie sollten mit *noexcept* (siehe Abschnitt 10.8) gekennzeichnet werden:

- in einem Destruktor
- in einer *move*-Operation
- in einer *swap*-Funktion

Der Programmablauf bei einer Exception ist allerdings **weniger strukturiert** als bei den üblichen Kontrollstrukturen und deshalb schwerer aus dem Programmtext abzuleiten. Während mit *if*, *while* usw. immer ein ganzer Block kontrolliert wird, kann man mit *throw* in den Exception-Handler einer aufrufenden Funktion springen. Deshalb sollten **Exceptions nur**

**dann** verwendet werden, wenn mit den üblichen Kontrollstrukturen keine zufriedenstellende Lösung möglich ist. Insbesondere sollte man *throw*-Ausdrücke nicht für trickreiche Programmabläufe wie ein *goto* in eine aufrufende Funktion verwenden.

Beispiel: Wenn beim Lesen nach dem Ende einer Datei eine Exception ausgelöst wird, kann man alle Daten einer Datei auch in einer Endlosschleife lesen und die Schleife mit einer Exception verlassen:

```
try {
    ifstream f("c:\\test\\test.dat");
    f.exceptions(ios::eofbit | ios::failbit);
    char c;
    while (true)
        f >> c;
}
catch (ios_base::failure& e)
{
    // ...
};
```

Die Schleifenbedingung *f* ist allerdings meist leichter verständlich, da sie direkt zum Ausdruck bringt, dass eine Datei ganz gelesen wird.

## 10.4 Exceptions weitergeben

Auch in einem **Exception-Handler** kann man wieder eine **Exception auslösen**. Gibt man dabei nach *throw* keinen Ausdruck an, wird die aktuelle Exception an den nächsten umgebenden Handler weitergegeben. Wird dagegen ein Ausdruck angegeben, wird die aktuelle Exception gelöscht und eine neue Exception mit dem angegebenen Ausdruck ausgelöst.

Beispiele: Eine von einem *logic\_error* abgeleitete Exception wird weitergegeben:

```
try { /*...*/ }
catch (logic_error&)
{
    cout << "logisch" << endl;
    throw; // gibt die Exception weiter
}
```

Eine von einem *logic\_error* abgeleitete Exception wird hier als *runtime\_error* weitergegeben:

```
try { /*...*/ }
catch (logic_error&)
{ // löse eine neue runtime_error Exception aus
    throw runtime_error("Ausgetrickst!");
} // löscht die logic_error Exception
```

Wenn man in mehreren Funktionen einheitlich auf verschiedene Exceptions reagieren will, ist es nicht notwendig, in jede Funktion einen identischen Exception-Handler aufzunehmen. Die Behandlung der Exceptions kann man in einer Funktion zusammenfassen, die die aktuelle Exception erneut auslöst und alle Exceptions behandelt:

Beispiel: Die zentraleFehlerbehandlung

```
struct C{virtual ~C()=default;}; //C und D nur um zu zeigen,
struct D:C { }; // dass das nicht nur mit std::exception geht

void zentraleFehlerbehandlung()
{
    try {
        throw;
    }
    catch (const D&) {
        std::cout << "D" << std::endl;
    }
    catch (const C&) {
        std::cout << "C" << std::endl;
    }
    catch (const std::exception& ex)
    {
        std::cout << "std::exc: " << ex.what() << std::endl;
    }
    catch (...)
    {
        std::cout << "Was war das? " << std::endl;
    }
}
```

kann man in jeder Funktion in einem Exception-Handler für alle Exceptions (mit ...) aufrufen:

```
void f(int x)
{
    try
    {
        if (x == 1) throw C();
        if (x == 2) throw D();
        if (x == 3) throw std::runtime_error("2");
    }
    catch (...)
    {
        zentraleFehlerbehandlung();
    }
}
```

Das ist eine der wenigen Anwendungsmöglichkeiten von catch(...). Diese Form von catch sollte man ansonsten eher nicht verwenden.

Ähnlich wie mit *throw* ohne einen Ausdruck kann man eine Exception auch mit der seit C++11 verfügbaren Klasse

```
class exception_ptr { ... } // ähnlich wie ein shared_ptr
```

und den Funktionen

```
exception_ptr current_exception() noexcept { ... }
inline void rethrow_exception(exception_ptr p)

template <class E>
exception_ptr make_exception_ptr(E exc) noexcept { ... }
```

weitergeben und in einer anderen Funktion behandeln. Im Unterschied zu *throw* kann man damit auch Exceptions aus einem *thread* weitergeben (siehe Abschnitt 17.1.6).

Eine Variable des Typs *exception\_ptr* kann eine beliebige Exception darstellen. Einer solchen Variablen weist man normalerweise den Funktionswert von *current\_exception()* zu. *current\_exception()* wird normalerweise in einem Exception-Handler aufgerufen und stellt dann die aktuelle Exception dar. Den Rückgabewert übergibt man dann einer Funktion, in der die Exception in einem *try*-Block mit *rethrow\_exception* erneut ausgelöst und dann im zugehörigen Exception-Handler behandelt wird.

Beispiel: Die Funktion zur Behandlung der Exceptions

```
void zentraleFehlerbehandlung(const std::exception_ptr& e)
{ // bis auf rethrow_exception wie oben
  try {
    std::rethrow_exception(e); // anstelle von throw;
  }
  catch (const D&) {
    std::cout << "D" << std::endl;
  }
  catch (const C&) {
    std::cout << "C" << std::endl;
  }
  ...
}
```

wird in einem *catch(...)*-Block aufgerufen:

```
try { Aufgabe_1(); }
catch (...) { zentraleFehlerbehandlung
               (std::current_exception()); }
```

## 10.5 Fehler und Exceptions

Bisher wurde immer nur relativ undifferenziert davon gesprochen, dass eine Exception bei einem „Fehler“ ausgelöst wird. Nachdem wir nun gesehen haben, wie man an einer beliebigen Stelle eine Exception auslösen kann, stellt sich die Frage, wann das sinnvoll und was in diesem Zusammenhang überhaupt ein „Fehler“ ist.

Der Ausgangspunkt für die folgenden Ausführungen ist, dass jede Anweisung und jede Funktion **eine bestimmte Aufgabe** (ihre Spezifikation) hat. Wenn sie keine solche Aufgabe hätte, wäre sie auch nicht geschrieben worden. Ein **Fehler** ist dann dadurch charakterisiert, dass eine Funktion ihre Aufgabe nicht erfüllen kann.

Beispiel: Alle bisher betrachteten Exceptions von C++ und der Standardbibliothek werden nach einem solchen Fehler ausgelöst:

- Wenn der mit *new* angeforderte Speicher nicht zur Verfügung gestellt werden kann, hat die Anweisung mit *new* ihre Aufgabe nicht erfüllt.
- Wenn der Zugriff auf ein Container-Element nicht zulässig ist.
- Wenn ein String nicht in ein bestimmtes Format (wie *int* oder ein Kalenderdatum) umgewandelt werden kann.

Nach einem solchen Fehler gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Es ist sinnlos, weitere Anweisungen auszuführen, da diese vom Ergebnis des Aufrufs abhängen und nur Folgefehler nach sich ziehen.
2. Die folgenden Anweisungen hängen nicht vom Ergebnis dieses Aufrufs ab und können problemlos ausgeführt werden.

Wenn man **Funktionen so konstruiert**, dass sie **genau dann eine Exception** auslösen, wenn sie **ihre Aufgabe nicht erfüllen**, kann man diese beiden Fälle folgendermaßen umsetzen:

1. Anweisungen, die voneinander abhängig sind und bei denen ein Fehler Folgefehler nach sich zieht, fasst man in einem Block nach *try* zusammen.
2. Anweisungen, die voneinander unabhängig sind, können in getrennten *try*-Blöcken enthalten sein: Wenn ein Fehler in einem ersten Teil eines Programms keine Auswirkungen auf einen anderen Teil hat, braucht der andere Teil nach einem Fehler im ersten Teil auch nicht abgebrochen werden.

Beispiel: Wenn die Funktion *f2* nur dann ausgeführt werden soll, wenn der Aufruf von *f1* nicht zu einem Fehler geführt hat, aber *f3* unabhängig davon, kann man eine Programmstruktur wie die folgende verwenden:

```
try {  
    f1();  
    f2();  
}  
catch (exception1&) { cout << "Fehler in f1" << endl; }  
catch (exception2&) { cout << "Fehler in f2" << endl; }
```



```
try {
    f3();
}
catch (exception3&) { cout << "Fehler in f3" << endl; }
```

Weitere typische Anwendungen sind Programme, die verschiedene Optionen in einem Menü anbieten. Wenn eine Option zu einem Fehler führt, kann man nach einem Hinweis auf diesen Fehler oft die weiteren Optionen ausführen.

Das gilt auch für die Konstruktoren einer Klasse: Falls ein **Konstruktor** aus den Argumenten kein Objekt erzeugen kann, das die Klasseninvariante erfüllt (d.h. ein Objekt der Realität ist, siehe Abschnitt 8.1.7), löst man eine Exception aus und verwendet solche Objekte in einem *try*-Block.

In **Programmiersprachen ohne Exception-Handling** wird meist folgendermaßen auf Fehler reagiert:

- Nach einem schweren Fehler (z.B. einer Division durch Null) wird das Programm meist abgebrochen. Dadurch wird aber auch die Ausführung von Anweisungen unterbunden, die von diesem Fehler überhaupt nicht betroffen sind.
- Bei weniger schweren Fehlern wird eine Statusvariable (wie *errno* in C) gesetzt oder ein spezieller Funktionswert zurückgegeben.

Exception-Handling ermöglicht gegenüber diesen konventionellen Techniken eine **differenziertere** Reaktion und übersichtlichere Programme (siehe Abschnitt 10.1).

Wenn man **alle Funktionen** in einem Programm **so konstruiert**, dass sie **genau dann eine Exception** auslösen, wenn sie **ihre Aufgabe nicht erfüllen**, und alle solchen Funktionen in einer *try*-Anweisung aufruft, tritt immer genau dann eine Exception auf, wenn eine Funktion ihre Aufgabe nicht erfüllen kann. Wenn keine Exception auftritt, kann man sicher sein, dass alle Funktionen ihre Aufgabe erfüllt haben.

Beispiel: Wenn die Funktionen *f1*, *f2* und *f3* bei jedem Fehler eine Exception auslösen, und bei

```
try {
    f1();
    f2();
    f3();
}
catch (...) // passt zu jeder Exception
{
    cout << "da ging was schief" << endl;
}
```

keine Fehlermeldung angezeigt wird, kann man sicher sein, dass kein Fehler aufgetreten ist.

Oft kann man für eine Funktion nachweisen, dass sie ihre Aufgabe erfüllt, wenn ihre Argumente bestimmte Bedingungen (die Vorbedingungen) erfüllen. Dann kann man eine Exception auslösen, wenn sie nicht erfüllt sind.

Beispiel: Damit man auch von den Funktionen aus `<math.h>` bei einem Fehler eine Exception erhält, ist es oft am einfachsten, sie durch eigene Funktionen zu ersetzen, die bei einem Fehler eine Exception auslösen:

```
double Sqrt(double d) // Ersatz für sqrt
{
    if (d<0)
        throw std::runtime_error("negatives Argument Sqrt");
    return sqrt(d);
}
```

Hier ist die Vorbedingung ( $d \geq 0$ ), und wenn diese nicht erfüllt ist, wird eine Exception ausgelöst. Man könnte auch die globale Variable `errno` verwenden und eine Exception auslösen, wenn diese auf einen von Null verschiedenen Wert gesetzt wird.

Die Standardbibliothek stellt für verletzte Vorbedingungen, die man vor dem Aufruf einer Funktion entdecken kann, die Klasse ***logic\_error*** (siehe Seite 562) zur Verfügung. Die Klasse ***runtime\_error*** ist dagegen für Fehler gedacht, die man nur schwer vor dem Aufruf einer Funktion entdecken kann und die erst während ihrer Laufzeit festgestellt werden können. Dazu gehört z.B. der Aufruf einer Funktion wie *exp*, bei der es recht aufwendig ist, vor dem Aufruf zu prüfen, ob die Argumente zu einem Überlauf führen.

Meyer (1997, Kap. 11) betrachtet die Beziehungen zwischen einer Funktion und ihrem Aufrufer unter dem Stichwort „**design by contract**“ als formalen Vertrag, bei dem jeder Beteiligte Rechte und Pflichten hat. Eine Funktion hat die Pflicht, ihre Spezifikation zu erfüllen, wenn der Aufrufer ihre Vorbedingungen einhält. Und der Aufrufer hat die Pflicht, beim Aufruf einer Funktion ihre Vorbedingungen einzuhalten. Wenn einer der Beteiligten seine Pflicht nicht erfüllt, ist der Vertrag zwischen den beiden gebrochen („**When the contract is broken**“, Kap. 12). Er empfiehlt, genau bei einer solchen Vertragsverletzung eine Exception auszulösen.

In der Programmiersprache C werden Vor- und Nachbedingungen oft mit dem Makro *assert* überprüft. Falls dabei eine Bedingung nicht erfüllt ist, wird das Programm abgebrochen. Diese Reaktion ist aber oft zu drakonisch. Gegenüber *assert* kann man Exceptions als **Verfeinerung** betrachten. In C++ hat *assert* eigentlich nur noch bei solchen Fehlern eine Berechtigung, für die keine Fehlerbehandlung vorgesehen ist und die nicht abgefangen werden dürfen.

## 10.6 Die Freigabe von Ressourcen bei Exceptions: RAII

Wenn ein Programm Ressourcen (Hauptspeicher, Dateien usw.) reserviert, sollten diese nach Gebrauch wieder freigegeben werden, damit sie für andere Anwendungen zur Verfügung stehen. Eine solche Freigabe sollte auch nach einer Exception erfolgen.

In der folgenden Funktion wird zunächst Speicher reserviert. Wenn diese dann in einem *try*-Block aufgerufen wird und beim Aufruf der Funktion *f* eine Exception auftritt, wird *delete* nicht erreicht und der Speicher nicht mehr freigegeben.

```
void MemoryLeak()
{
    int* p = new int[1024]; // 4 KB bei einem 32-Bit System
    f(); // löst eventuell eine Exception aus
    delete[] p;
}
```

Eine unnötige Reservierung von 4 KB Hauptspeicher hat meist keine gravierenden Auswirkungen und wird oft nicht einmal bemerkt. Falls das aber oft geschieht, kann die Auslagerungsdatei groß und das Programm langsamer werden. Wenn eine Datei reserviert und nicht mehr freigegeben wird, können andere Anwender eventuell nicht mehr auf sie zugreifen, bis man das Programm beendet und neu startet.

Dass in einer Funktion wie *MemoryLeak* Ressourcen nicht mehr freigegeben werden, ergibt sich aus den Sprachelementen des Exception-Handling. In einer Programmiersprache ohne Exception-Handling gibt es beim Aufruf einer solchen Funktion nur die beiden Möglichkeiten:

- Der Aufruf von *f* führt nicht zu einem Programmabbruch. Dann wird auch *delete* erreicht und die Ressource wieder freigegeben.
- Wenn der Aufruf von *f* zu einem Programmabbruch führt, wird der Speicher vom Betriebssystem freigegeben.

Auf den ersten Blick mag der folgende Ansatz zur Lösung dieses Problems naheliegend erscheinen:

```
int* p = new int[1024]; // reserviere die Ressource
try {
    // verwende die Ressource
}
catch (...)
{
    delete[] p; // bei einer Exception freigeben
    throw; // damit das zweite delete übersprungen wird
}
delete[] p; // p freigeben, falls keine Exception auftritt
```

Hier wird die Ressource vor der *try*-Anweisung reserviert und ausschließlich im Block nach *try* verwendet. Falls dabei eine Exception auftritt, wird sie im Block nach *catch* wieder freigegeben. Falls dagegen keine Exception auftritt, wird dieser Block nie ausgeführt und die

Ressource nach der *try*-Anweisung freigegeben. Durch „throw;“ wird sichergestellt, dass sie nicht zweimal freigegeben wird und dass die Exception in einem umgebenden *try*-Block behandelt werden kann.

Dieser Ansatz ist allerdings recht aufwendig. Eine einfachere Alternative erhält man, indem die Ressource

- in einer Klasse definiert und
- im Destruktor der Klasse wieder freigegeben wird.

Da für eine in einem Block definierte nicht statische Variable eines Klassentyps beim Verlassen des Blocks (auch aufgrund einer Exception) immer ihr Destruktor (siehe Abschnitt 8.1.5) aufgerufen wird, wird die Ressource beim Verlassen des Blocks immer freigegeben. Stroustrup (1997, Abschnitt 14.4.1) bezeichnet diese Technik als „resource acquisition is initialization (RAII)“ („**Ressourcenbelegung ist Initialisierung**“).

Beispiel: Der für ein Objekt der Klasse

```
class myVerySimpleSmartPointer {
    int* v;
public:
    myVerySimpleSmartPointer() { v = new int; };
    virtual ~myVerySimpleSmartPointer() { delete v; };
};
```

reservierte Speicher wird beim Verlassen des Blocks wieder freigegeben, in dem eine Variable dieser Klasse definiert wird, und zwar auch dann, wenn beim Aufruf von *f* eine Exception auftritt:

```
void g()
{
    myVerySimpleSmartPointer a;
    f(); // löst eventuell eine Exception aus
}
```

Viele **Klassen der Standardbibliothek** sind nach diesem Schema konstruiert und geben die von ihnen reservierten Ressourcen im Destruktor wieder frei. Dadurch ist automatisch sichergestellt, dass jede lokale, nicht statische Variable einer solchen Klasse ihre Ressourcen auch bei einer Exception wieder freigibt.

- Alle **Stream-Klassen** der Standardbibliothek heben die Reservierung einer Datei im Destruktor wieder auf. Im Unterschied zu den C-Funktionen zur Dateibearbeitung besteht mit diesen Klassen also keine Gefahr, dass eine Datei nach einer Exception unnötig reserviert bleibt.
- Die Destruktoren der **Container-Klassen** aus der Standardbibliothek geben den gesamten Speicherbereich wieder frei, den ein Container belegt. Dabei wird der Destruktor für jedes Element des Containers aufgerufen.
- Die smart pointer Klasse *shared\_ptr* (siehe Kapitel 18) verwendet RAII und Referenzzähler, um Speicherlecks zu vermeiden. Ihr Kopierkonstruktor zählt bei jeder

Kopie einen Referenzzähler hoch. Im Destruktor wird dieser Zähler um 1 reduziert. Wenn er bei 0 angekommen ist, wird die Ressource freigegeben.

Die Freigabe von Ressourcen im Destruktor findet automatisch in der **richtigen Reihenfolge** statt. Werden mehrere Ressourcen reserviert, kann eine später reservierte eine früher reservierte verwenden. Deshalb muss die später reservierte Ressource vor der früher reservierten freigegeben werden. Diese Anforderung wird erfüllt, da die Destruktoren immer in der umgekehrten Reihenfolge ihrer Konstruktoren ausgeführt werden (siehe Abschnitt 8.2.2).

## 10.7 Exceptions in Konstruktoren und Destruktoren

Wenn **im Konstruktor** einer Klasse eine **Exception** auftritt, wird für alle Elemente der Klasse, deren Konstruktor zuvor vollständig ausgeführt wurde, ihr Destruktor aufgerufen. Da für alle Elemente eines Klassentyps ihr Konstruktor immer vor der Ausführung der Anweisungen im Konstruktor aufgerufen wird (siehe Abschnitt 8.2.2), sind alle solchen Elemente vor der Ausführung der Anweisungen im Konstruktor vollständig konstruiert. Deshalb werden die von Elementen eines Klassentyps reservierten Ressourcen bei einer Exception im Konstruktor wieder freigegeben. Exceptions während der Ausführung von Elementinitialisierern können mit einem *function-try*-Block abgefangen werden.

Beispiel: Wenn die Funktion *init* im Konstruktor von C1 eine Exception auslöst, wird der zuvor mit *new* reservierte Speicher nicht wieder freigegeben:

```
class C1 {
    int* p;
public:
    C1()
    {
        p = new int[100];
        init(); // löst eventuell eine Exception aus
    }
}
```

Da vor dem Aufruf der Anweisungen im Konstruktor von C2 der Standardkonstruktor für den *vector* *v* aufgerufen wird, ist das Element *v* beim Aufruf von *init* vollständig konstruiert. Wenn dann der Aufruf von *init* eine Exception auslöst, wird der von *v* belegte Speicher wieder vollständig freigegeben:

```
class C2 {
    vector<int> v;
public:
    C2() { // Konstruktor von C2
        v.push_back(17);
        init(); // löst eventuell eine Exception aus
    }
}
```

Initialisiert man ein Element *e* einer Klasse *C* mit einem **Elementinitialisierer**, wird der Konstruktor für *e* vor den Anweisungen im Konstruktor von *C* ausgeführt. Deshalb kann man eine Exception im Konstruktor von *e* nicht in einer *try*-Anweisung im Konstruktor von *C* abfangen. Dafür steht das Sprachkonstrukt

*function-try-block:*  
`try ctor-initializer opt function-body handler-seq`

zur Verfügung. Ein ***function-try-block*** kann nur in einem Konstruktor verwendet werden.

Definiert man einen Konstruktor mit einem *function-try-block*, führen nicht nur die in einem Elementinitialisierer ausgelösten Exceptions, sondern auch die im Konstruktor ausgelösten Exceptions zur Ausführung des zugehörigen Handlers.

Beispiel: Wenn ein Objekt der Klasse *C* mit dem Argument 0 für *i\_* erzeugt wird, führt das beim Aufruf der Funktion *f* zu einer Division durch 0:

```
int f(int i)
{
    return 1 / i;
}

class C {
    int i;
    double d;
public:
    C(int, double);
};

C::C(int i_, double d_)
    try
    : i(f(i_)), d(d_)
    {
        // ... Anweisungen des Konstruktors von C
    }
    catch (...) // Dieser Handler behandelt alle
    { // Exceptions, die im Konstruktor oder in einem
        // seiner Elementinitialisierer auftreten
        // ...
    }
```

Ein **Destruktor** sollte normalerweise **keine Exceptions** auslösen oder weitergeben. Der Grund dafür ist, dass ein Destruktor auch als Folge einer Exception aufgerufen wird, wenn ein Block verlassen wird, und dann zwei oder mehr Exceptions bearbeitet werden müssen. Beim nächsten Exception-Handler stellt sich dann die Frage, welche dieser Exceptions abgefangen werden soll. Da diese Entscheidung nicht generell gelöst werden kann, führt das zum Aufruf der Funktion ***terminate***, die einen Programmabbruch zur Folge hat.

Beispiel: Es spricht aber nichts gegen Exceptions in einem Destruktor, wenn sie im Destruktor abgefangen werden:

```

~C()
{
    try { f(); } // f soll eine Exception auslösen
    catch (...)
    { /* reagiere auf die Exception */
    }
}

```

## Aufgaben 10

1. Geben Sie an, welche Anweisungen beim Aufruf der Funktion f

```

void f()
{
    try {
        try {
            f1();
            f2();
        }
        catch (...)
        {
            f3();
        }
        f4();
    }
    catch (...)
    {
        f5();
    }
}

```

ausgeführt werden, wenn

- a) in keiner der Funktionen f1, f2 usw. eine Exception ausgelöst wird
  - b) in f1 eine Exception ausgelöst wird
  - c) in f2 eine Exception ausgelöst wird
  - d) in f1 und f3 eine Exception ausgelöst wird
  - e) in f1 und f4 eine Exception ausgelöst wird.
2. Jede der Funktionen f1, f2, f3 und f4 soll eine Exception auslösen können. Fassen Sie Aufrufe f1(); f2(); f3(); f4() so in *try*-Anweisungen zusammen, dass
    - a) nach einer Exception die nächste Funktion nicht mehr aufgerufen wird.
    - b) nach einer Exception in f1 die Funktion f2 nicht mehr aufgerufen wird und das Programm mit f3 weitermacht. Wenn bei f3 eine Exception auftritt, soll f4 nicht mehr aufgerufen werden.
    - c) immer alle vier Funktionen aufgerufen werden.
  3. Definieren Sie eine Funktion mit einem *int*-Parameter, die in Abhängigkeit vom Wert des Arguments eine Exception des Datentyps

- a) *int*                                      c) *exception*
- b) *double*                                  d) *logic\_error*

auslöst und zeigen sie den jeweils übergebenen Wert bzw. den der Funktion *what* in einem Exception-Handler an.

4. Die Funktion *f* soll in Abhängigkeit vom Wert des Arguments eine Exception der Datentypen *exception*, *logic\_error*, *range\_error* oder *out\_of\_range* auslösen. Welche Ausgabe erzeugt ein Aufruf der Funktion in a)?

```
a) void g1(int i)
{
    try { f(i); }
    catch (logic_error& e)
    {
        cout << "logisch" << endl;
    }
    catch (out_of_range& e)
    {
        cout << "range " << endl;
    }
    catch (exception& e)
    {
        cout << "exception " << endl;
    }
};
```

Von welcher Klasse wird die Funktion *what* in b) bis d) aufgerufen?

```
b) void g2(int i)
{
    try { f(i); }
    catch (logic_error& e)
    {
        cout << e.what() << endl;
    }
    catch (out_of_range& e)
    {
        cout << e.what() << endl;
    }
    catch (exception& e)
    {
        cout << e.what() << endl;
    }
};
```

```
c) void g3(int i)
{
    try { f(i); }
```



```

        catch (exception e)
        {
            cout << e.what() << endl;
        }
    };

d) void g4(int i)
{
    try { f(i); }
    catch (exception& e)
    {
        cout << e.what() << endl;
    }
    catch (...)
    {
        cout << "irgendeine Exception" << endl;
    }
};

```

5. Oft findet man selbstdefinierte Exception-Klassen wie die folgenden. Vergleichen Sie diese:

```

class MeineException_1 : public std::exception
{
public:
    MeineException_1(const std::string& msg) noexcept:msg1(msg) {}
    MeineException_1(const char* msg) noexcept :msg2(msg) {}
private:
    std::string msg1;
    const char* msg2;
};

class MeineException_2 : public std::exception
{
public:
    MeineException_2(const std::string& msg) noexcept:msg1(msg) {}
    MeineException_2(const char* msg) noexcept : msg2(msg) {}
    const char* what() const noexcept override {
        return msg1.c_str(); // Variante 1
        return msg2;         // Variante 2
    };
private:
    std::string msg1; // Variante 1
    const char* msg2; // Variante 2
};

class MeineException_3 : public std::runtime_error
{
public:
    MeineException_3(std::string msg) noexcept :msg1(msg) {}
    MeineException_3(const char* msg) noexcept :msg2(msg) {}
};

```

```
private:
    std::string msg1;
    const char* msg2;
};
```

6. Beurteilen Sie die Funktion *Sqrt*:

```
class ENegative {};
```

```
double Sqrt(double d)
{
    try {
        if (d<0) throw ENegative();
        return sqrt(d);
    }
    catch (...)
    {
        cout << "negativ" << endl;
        return 0;
    }
}
```

7. Bei einem Aufruf der Funktion *f* soll eine Exception ausgelöst werden können. Stellen Sie sicher, dass der mit *new* reservierte Speicher auch wieder freigegeben wird.

```
void h()
{
    std::vector<int*> v = { new int(17) };
    f();
    for (auto i = v.begin(); i != v.end(); i++)
        delete *i;
}
```

8. a) Beurteilen Sie die Klasse *C* für den Fall, dass bei der Ausführung von *init* eine Exception ausgelöst wird:

```
class C {
    int* a;
    int* b;
    void init()
    {
        // ...
    }
};
```

```
public:
    C() : a(nullptr), b(nullptr)
    {
        a = new int();
        b = new int();
        init();
    }
```

```

    ~C()
    {
        delete a;
        delete b;
    }
};

```

- b) Überarbeiten Sie die Klasse C so, dass auch dann, wenn *init* eine Exception auslöst, kein Speicherleck auftritt.

## 10.8 *noexcept*

Durch eine ***noexcept*-Spezifikation** bei einer Funktion (oder einem Funktions-Template, Lambda-Ausdruck usw.) kann man zum Ausdruck bringen, dass die Funktion keine Exception auslöst. Das zeigt dem Leser der Funktionsdefinition, dass er die Funktion nicht in einem *try*-Block aufrufen muss. Und der Compiler kann sich den Aufwand für die Suche nach einem passenden Exception-Handler sparen. Der Laufzeiteffekt dieser Optimierungsmöglichkeit allerdings meist gering:

| Benchmarks Visual Studio 2019.5, x64, Release /O2  |          |
|----------------------------------------------------|----------|
| <i>fibonacci(42)</i> rekursiv ohne <i>noexcept</i> | 1,7 Sek. |
| <i>fibonacci(42)</i> rekursiv mit <i>noexcept</i>  | 1,7 Sek. |

Eine *noexcept*-Spezifikation ist in den beiden Formen

```

noexcept
noexcept(true)

```

möglich: Beide bedeuten, dass die Funktion keine Exception auslöst. Mit

```

noexcept(false)

```

oder keiner *noexcept*-Spezifikation drückt man aus, dass eine Funktion eine Exception auslösen kann. Auch diese beiden Varianten sind gleichwertig, außer bei Destruktoren, bei denen ein kleiner Unterschied besteht.

Eine *noexcept*-Spezifikation bedeutet nicht, dass die Funktion keine Exception auslösen darf. Wenn eine Exception ausgelöst (auch durch den Aufruf einer Funktion, die eine Exception auslöst) wird, muss sie aber in der Funktion abgefangen werden. Wenn eine Funktion mit einer *noexcept*-Spezifikation doch eine Exception auslöst, ist ein Programmabbruch die Folge.

Im C++-Standard wird mit *noexcept* dokumentiert, dass eine Funktion keine Exception auslöst. Ein vom Compiler automatisch erzeugter Standardkonstruktor, Kopierkonstruktor, Zuweisungsoperator, Move-Konstruktor und Move-Zuweisungsoperator hat eine *noexcept*-Spezifikation.

Beispiele: Eine *noexcept*-Spezifikation wird nach der Parameterliste der Funktion angegeben:

```
void fn() noexcept {};  
auto f1 = []()noexcept {}; // Lambda-Ausdruck
```

Ruft man *fd* mit einem negativen Argument auf, bricht das Programm ab:

```
void fd(int n) noexcept  
{  
    if (n < 0)  
        throw std::runtime_error("Aber doch nicht hier");  
}
```

Mit dem **Operator *noexcept*** kann man prüfen, ob eine Funktion eine *noexcept*-Spezifikation hat. Dieser Operator wird zur Compilezeit ausgewertet und gibt einen booleschen Wert zurück.

Beispiel: Gibt man in der *noexcept*-Spezifikation einer Funktion die *noexcept*-Operatoren aller aufgerufenen Funktionen an wie in

```
void fc() noexcept(noexcept(fn) && noexcept(fd))  
{  
    fn();  
    fd(1);  
}
```

entspricht das *noexcept(true)*, wenn alle aufgerufenen Funktionen die Spezifikation *noexcept(true)* haben. Allerdings werden solche Ausdrücke bei vielen aufgerufenen Funktionen unhandlich.

## 10.9 Exception-Sicherheit

Die Auswirkung eines Fehlers auf den Zustand eines Programms bzw. Objekts wird als **Exception-Sicherheit** bezeichnet. Dabei geht es darum, ob das Programm bzw. ein Objekt auch dann noch in einem zulässigen Zustand ist, wenn eine Operation mit diesem Objekt aufgrund einer Exception abgebrochen wird.

Die Exception-Sicherheit einer Operation wird üblicherweise in die folgenden Kategorien eingeteilt (in abnehmender Reihenfolge der Exception-Sicherheit):

1. Es werden keine Exceptions ausgelöst oder weitergegeben („no throw guarantee“)

Das bedeutete im Idealfall, dass keine Fehler auftreten können. Es gilt aber auch für alle C-Funktionen (z.B. *fclose*), da diese keine Exceptions auslösen können. Es gilt auch für C++-Funktionen, die keine Exceptions auslösen oder weitergeben (weil die Exceptions

in der Funktion abgefangen werden). Diese werden üblicherweise mit *noexcept* gekennzeichnet.

In C++ lösen *std::swap*, die vom Compiler erzeugten Destruktoren und *move*-Konstruktoren keine Exception aus. Selbstdefinierte *swap*-Funktionen, Destruktoren und *move*-Konstruktoren sollen ebenfalls keine Exceptions auslösen.

Beispiel: Eine Funktion, die eine Exception nicht an den Aufrufer weitergibt, erfüllt die „no throw guarantee“.

```
~C() noexcept
{
    try { f(); } // f löst vielleicht eine Exception aus
    catch (...) { cout << "Ignoriere Exception!" << endl; }
}
```

## 2. Starke Exception-Sicherheit („strong exception safety“)

Diese Stufe der Exception-Sicherheit ist dann gegeben, wenn eine Operation entweder erfolgreich ist oder keine Auswirkungen hat. Sie ist oft bei Operationen wünschenswert, die aus mehreren Funktionsaufrufen bestehen, die entweder alle erfolgreich sind, oder alle keine Auswirkung haben.

Das kann man zum Beispiel dadurch erreichen, dass man die Operation aufteilt: In einem ersten Teil, in dem eine Exception auftreten kann, arbeitet man mit einer Kopie des Objekts. Diese Kopie vertauscht man dann in einem zweiten Teil mit *std::swap* mit dem Objekt. Da bei *std::swap* keine Exception auftreten kann, ist die gesamte Operation entweder erfolgreich, oder verändert das Objekt nicht.

Beispiel: Wenn eine Klasse zwei Container enthält, von denen der erste den Schlüsselwert zu einem Wert im zweiten Container enthält, bedeutet starke Exception-Sicherheit, dass beim Einfügen zu jedem Schlüsselwert auch ein Wert abgelegt. Falls nach dem Ablegen eines Schlüsselwerts eine Exception auftritt, würde der Wert zu diesem Schlüsselwert fehlen.

Das kann man folgendermaßen verhindern:

```
void insert1(int key, string value)
{
    auto KeysCopy = keys; // Teil 1: Arbeite mit einer Kopie
    auto ValuesCopy = values;
    KeysCopy.push_back(key);
    ValuesCopy.push_back(value);

    std::swap(KeysCopy, keys); // Teil 2: vertausche die
    std::swap(ValuesCopy, values); // Kopie mit dem Original
}
```

Hier wird die starke Exception-Sicherheit durch den Aufwand für das Kopieren erkauft. Falls die einzelnen Operationen selbst stark exception-sicher sind, erreicht man die Exception-Sicherheit der Gesamtoperation oft einfacher.

Beispiel: Da *push\_back* bei einem *vector* exception-sicher ist, ist die nächste Variante *insert2* auch exception-sicher:

```
void insert2(int key, string value)
{
    keys.push_back(key);
    try { values.push_back(value); }
    catch (...) { keys.pop_back(); }
}
```

Nach 4. folgt eine Tabelle mit der Exception-Sicherheit bei einigen Operationen einiger Container der Standardbibliothek.

Falls die einzelnen Operationen aber nicht exception-sicher sind, ist die Exception-Sicherheit einer Gesamtoperation oft nur schwierig oder nur zeitaufwendig erreichbar. Diese starke Exception-Sicherheit ist wünschenswert, aber nicht immer notwendig.

### 3. Grundlegende Exception-Sicherheit („basic exception safety“)

Diese Stufe der Exception-Sicherheit ist dann gegeben, wenn bei einer Operation keine Ressourcen-Leaks auftreten und die Klasseninvarianten erhalten bleiben. Die Vermeidung von Ressourcen-Leaks kann man mit RAII erreichen.

Während eine starke Exception-Sicherheit zwar wünschenswert, aber nicht immer notwendig ist, sollte man die grundlegende Exception-Sicherheit immer implementieren. In der Standardbibliothek sind alle Operationen grundlegend exception-sicher.

Beispiel: Die Variante *insert3* zeigt, dass RAII für die grundlegende Exception-Sicherheit nicht ausreichend ist:

```
void insert3(int key, string value)
{
    keys.push_back(key);
    values.push_back(value); // Falls hier eine Exception
                             // auftritt, gibt es zu key keinen value
}
```

Wenn beim zweiten *push\_back* eine Exception auftritt (z.B. weil nicht genügend Speicher für den neuen *value* vorhanden ist), ist die Anforderung, dass zu jedem *key* ein *value* existiert, nicht erfüllt.

Durch die Anforderung, dass alle Klasseninvarianten eingehalten werden, ist garantiert, dass man auch nach einer Exception mit dem Objekt arbeiten kann. Es kann aber vorkommen, dass eine Operation nur teilweise durchgeführt wird.

Beispiel: Wenn der Kopierkonstruktor der Klasse *C* für das dritte Element von *c* eine Exception auslöst (das dürfte in der Praxis aber eher selten vorkommen),

```
std::vector<C> c = { .... };
std::vector<C> d;
```

werden durch

```
try
{
    for (const auto& a : c)
        d.push_back(a);
}
catch (const std::exception& e)
{
    cout << e.what() << endl;
}
```

nur die ersten beiden Elemente kopiert. Mit d kann man aber trotz der Exception ganz normal arbeiten.

4. Keine Exception-Sicherheit

Wenn keine Aussagen darüber gemacht werden, dass bei einer Exception eine grundlegende oder eine starke Exception-Sicherheit besteht. Das heißt, dass das Programm nach einer Exception in einem unzulässigen Zustand sein kann, weil z.B. ein Memory Leak aufgetreten ist.

Alle Elementfunktionen, Operationen und Algorithmen der Standardbibliothek sind grundlegend exception-sicher. Die nächste Tabelle enthält einige Operationen, die bei manchen Containern eine stärkere Exception-Sicherheit haben. Bei einigen dieser Operationen müssen aber noch weitere Bedingungen erfüllt sein, die in der Praxis aber meist erfüllt sind.

| exception guarantee                | <i>push back</i> | <i>insert</i> | <i>erase</i> |
|------------------------------------|------------------|---------------|--------------|
| <i>vector / deque</i>              | strong           | strong        | nothrow      |
| <i>string</i> - seit C++11         | strong           | strong        | strong       |
| <i>list</i>                        | strong           | strong        | nothrow      |
| <i>map/unordered map</i>           | --               | strong        | nothrow      |
| <i>multimap/unordered multimap</i> | --               | strong        | nothrow      |

10.10 Die Exception-Klasse *system\_error*

Nach

```
#include <system_error>
```

ist die Klasse *system\_error* verfügbar, mit der man eine Fehlernummer des Betriebssystems durch eine Exception darstellen kann. Die Elementfunktion *code()* gibt diese Nummer zurück, und *what()* eine Meldung.

Beispiel: Mit

```
void convert_system_error_to_exception(int error)
{
    try
    {
        throw std::system_error(error, std::system_category());
    }
    catch (std::system_error& error)
    {
        std::cout << "Error: " << error.code() << " - " <<
                    error.what() << '\n';
    }
}
```

erhält man beim Aufruf mit Konstanten aus

```
#include <errno.h>

convert_system_error_to_exception(EPERM); // #define EPERM 1
convert_system_error_to_exception(ENOENT); // #define ENOENT 2
convert_system_error_to_exception(ESRCH); // #define ESRCH 3
```

Meldungen wie

```
Error: system:1 - Unzulässige Funktion.
Error: system:2 - Das System kann die angegebene Datei nicht finden.
Error: system:3 - Das System kann den angegebenen Pfad nicht finden.
```



## 11 Containerklassen der C++-Standardbibliothek

Zum C++-Standard gehört eine umfangreiche Standardbibliothek. Fast 1400 der 1850 Seiten dieses Standards befassen sich allein mit dieser Bibliothek. Derjenige Teil der Standardbibliothek, der Container und Algorithmen umfasst, wird auch als **Standard Template Library (STL)** bezeichnet.

Die Standardbibliothek enthält Klassen und Algorithmen, die bei vielen alltäglichen Programmieraufgaben (z.B. für Strings oder bei der Verwaltung von Daten in Containern und Dateien) einfache und effiziente Lösungen ermöglichen. Ihre Verwendung reduziert den Entwicklungsaufwand und führt zu übersichtlichen Programmen, die meist schneller sind und weniger Ressourcen benötigen als selbstgestrickte Lösungen. Die Architektur dieser Bibliothek (auf der Basis von Templates) ermöglicht eine einfache und flexible Verwendung. Damit besteht keine Notwendigkeit mehr, dynamische Arrays, verkettete Listen, Binärbäume, Hash-Container und zugehörige Algorithmen selbst zu schreiben.

In diesem Kapitel werden zunächst die wichtigsten Container vorgestellt. Weitere Konzepte und Algorithmen folgen in Kapitel 15 nach der Vorstellung von Templates und Lambda-Ausdrücken, die oft eine einfachere und flexiblere Nutzung der Standardbibliothek ermöglichen.

### 11.1 Sequenzielle Container der Standardbibliothek

Die STL besteht vor allem aus Klassen- und Funktions-Templates (siehe Kapitel 14). „Template“ kann man mit „Schablone“ oder „Vorlage“ übersetzen. Eine solche Schablone definiert das „Layout“ für eine Klasse bzw. Funktion und hat einen Datentyp als Parameter. Bei der Definition einer Variablen einer solchen Klasse übergibt man dann einen Datentyp als Argument. Daraus erzeugt der Compiler dann eine Klasse und eine Variable mit dem angegebenen Datentyp. Beim Aufruf eines Funktions-Templates erzeugt er eine Funktion und ruft diese auf.

#### 11.1.1 Die Container-Klasse *vector*

Die aus dem Klassen-Template ***vector*** erzeugten Klassen gehören zu den sogenannten **Container-Klassen**, da man in Variablen dieser Klassen Daten speichern kann. Weitere

Container-Klassen sind *list*, *stack*, *queue* usw. Sie unterscheiden sich von einem *vector* durch ihre interne Organisation und die verfügbaren Elementfunktionen.

Ein *vector* kann wie ein Array verwendet werden. Er unterscheidet sich von einem Array aber dadurch, dass er den Speicherplatz für die Elemente automatisch verwaltet: Falls ein neues Element im *vector* abgelegt wird und der bisher reservierte Speicherplatz nicht ausreicht, wird automatisch neuer Speicherplatz reserviert. Dazu wird intern ein dynamisches Array verwendet. Außerdem enthält ein *vector* im Unterschied zu einem Array zahlreiche Elementfunktionen.

Das Klassen-Template *vector* steht nach

```
#include <vector> // oder import std.core; (siehe Abschnitt 2.13)
using std::vector; // oder: using namespace std;
```

zur Verfügung. Mit einem Klassen-Template definiert man eine Klasse, indem man nach dem Namen des Templates in spitzen Klammern einen Datentyp angibt. Diese Klasse kann man dann wie einen vordefinierten Datentyp zur Definition von Variablen verwenden:

```
vector<int> v1;    // vector<int> ist ein Datentyp
vector<double> v2;
```

Nach diesen beiden Definitionen sind *v1* und *v2* leere Vektoren, die Elemente des Datentyps *int* bzw. *double* aufnehmen können.

Seit C++11 kann man einen Container bei seiner Definition mit einer **Initialisierungsliste** initialisieren. Eine solche Liste besteht aus einer durch Kommas getrennten Folge von Werten zwischen geschweiften Klammern. Sie kann bei der Definition einer Variablen direkt nach ihrem Namen oder ihrem Namen und einem Gleichheitszeichen angegeben werden:

```
vector<int> v3{ 1, 3, 5 };
vector<string> v = { "Rennfahrer", "Jonathan", "rast", "so", "schnell",
                    "wie", "er", "nur", "kann"};
```

Seit C++17 kann man den Datentyp bei der Definition einer Containerklasse auch weglassen, wenn der Compiler den Datentyp der Elemente aus der Initialisierungsliste ableiten kann:

```
vector w = { "Rennfahrer", "Jonathan", "rast", "so", "schnell", "wie",
            "er", "nur", "kann" };
```

*w* hat Elemente des Typs *const char\**, da ein Stringliteral diesen Typ hat.

Mit der Elementfunktion

```
void push_back(const T& x); // T ist der Elementtyp des Vektors
```

kann man einem Vektor Elemente am Ende hinzufügen. Dabei wird der Speicherplatz für das Element automatisch reserviert:

```
for (int i = 0; i < 100; i++) // fügt v1 100 Elemente hinzu
    v1.push_back(rand()); //für rand: #include <stdlib.h>
```

Die Anzahl der Elemente eines Vektors erhält man mit der Elementfunktion

```
size_type size() const; // size_type: ein Ganzzahldatentyp ohne Vorzeichen
```

Auf die einzelnen Elemente eines Vektors kann man mit dem **Indexoperator** []

```
for (int i = 0; i < v1.size(); i++)//oder size_t statt int
    cout << v1[i] << endl;
```

oder mit der Funktion *at* zugreifen:

```
for (int i = 0; i < v1.size(); i++)//oder size_t statt int
    cout << v1.at(i) << endl;
```

Diese beiden Zugriffsmöglichkeiten unterscheiden sich vor allem beim Zugriff auf Indizes außerhalb des zulässigen Bereichs 0.. *size()*–1.

- Falls man mit [] einen unzulässigen Index verwendet, werden wie bei Arrays Speicherbereiche adressiert, die nicht für den Vektor reserviert sind. Das kann eine Zugriffsverletzung und einen Programmabsturz zur Folge haben, muss es aber nicht.
- Falls man *at* mit einem unzulässigen Index verwendet, wird eine ***out\_of\_range* Exception** ausgelöst. Deshalb sollte man *at* nur in einer *try-catch*-Anweisung wie

```
try{
    int x = v2.at(10);
}
catch (std::exception& e)
{
    string msg = e.what(); // "invalid vector<T> subscript"
}
```

verwenden. Wie die nächste Tabelle zeigt, sind Zugriffe mit *at* jedoch langsamer als solche mit dem Indexoperator.

Der C++-Standard definiert den Datentyp *size\_type* als Ganzzahldatentyp ohne Vorzeichen. Deshalb hat auch ein Ausdruck wie

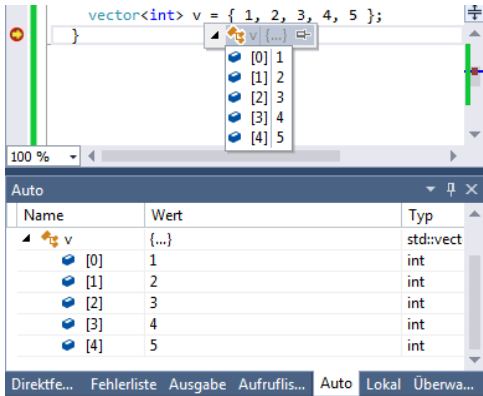
```
v1.size() - 1
```

diesen vorzeichenlosen Datentyp. Falls *v1.size()* den Wert 0 hat, ist *v1.size()*–1 dann nicht etwa –1, sondern der größte vorzeichenlose Ganzzahlwert. Die folgende Schleife ist deshalb mit *v1.size()*=0 eine Endlosschleife:

```
for (int i = 0; i <= v1.size() - 1; i++) // falsch
    cout << v1[i] << endl;
```

Mit einem Wert von *v1.size()* größer als Null werden die Elemente jedoch wie erwartet durchlaufen. Falls diese Schleife nur mit Vektoren getestet wird, die mindestens ein Element enthalten, bleibt der Fehler eventuell unentdeckt. Der Compiler weist zwar durch die Warnung „signed/unsigned mismatch“ auf dieses Problem hin. Da Warnungen aber oft übersehen werden, sollte man solche Schleifen **immer** mit der Bedingung *<v1.size()* formulieren.

Die Werte eines Vektors kann man im **Debugger** anzeigen, wenn man mit der Maus über den Namen des Vektors fährt oder diesen in eines der Auto, Lokal- oder Überwachen-Fenster übernimmt:



Vektoren haben nicht nur einen **Standardkonstruktor**, der wie bei der Definition von `v1` bzw. `v2` ohne Argumente aufgerufen werden kann und einen leeren Vektor erzeugt. Mit einem ganzzahligen Argument  $n \geq 0$  wird ein Vektor mit  $n$  Elementen angelegt. Diese Elemente haben für einen vordefinierten Datentyp `T` den Wert `0`, und für einen Klassentyp den von ihrem Standardkonstruktor erzeugten Wert. Mit einem zweiten Argument `x`, das in den Datentyp der Elemente des Vektors konvertierbar ist, erhalten die Elemente den Wert `x`.

```
int max = 1000;           // muss keine Konstante sein
vector<int> v3(max);       // v3.size()==max
vector<double> v4(max, 17); // jedes Element hat den Wert 17
```

Im Unterschied zu einem **C-Array** oder einem `std::array` muss die Anzahl der Elemente hier keine Konstante sein.

Da für einen Vektor alle Operationen eines Arrays (insbesondere der Indexoperator) zur Verfügung stehen, können alle Anweisungen für ein Array auch mit einem Vektor übersetzt werden.

Beispiel: Bei den folgenden Anweisungen (der Auswahlort von Abschnitt 4.2.7) wurde lediglich das Array `a` durch einen Vektor `a` mit `Max` Elementen ersetzt:

```
// int a[Max];
vector<int> a(Max);
for (int i = 0; i <= Max-2; i++)
{
    int Min = i;
    for (int j = i + 1; j <= Max-1; j++)
        if (a[j] < a[Min]) Min = j;
    int x = a[i]; a[i] = a[Min]; a[Min] = x;
}
```

Es ist allerdings nicht notwendig, für Arrays oder Vektoren eigene Sortierfunktionen zu schreiben. Die Standardbibliothek enthält den Algorithmus **sort** (siehe Abschnitt 15.8), den man nach `#include <algorithm>` sowohl mit Container-Klassen (z.B. `vector`) der Standardbibliothek als auch mit C-Arrays aufrufen kann. Dieser Algorithmus sortiert die Elemente mit dem Operator `<` (für einen selbstdefinierten Datentyp muss der mit einer Operatorfunktion definiert werden, siehe Abschnitt 7.3) oder einer Vergleichsfunktion.

Offensichtlich ist diese Sortierfunktion deutlich schneller als der Auswahlort:

| Benchmarks Visual Studio 2019.5, x64, Release /O2 |            |                    |                  |
|---------------------------------------------------|------------|--------------------|------------------|
| n=100'000                                         | int a[n]   | std::array<int, n> | std::vector<int> |
| <code>std::sort</code>                            | 0,006 Sek. | 0,006 Sek.         | 0,006 Sek.       |
| Auswahlort (siehe Abschnitt 4.2.7)                | 5,5 Sek.   | 5,5 Sek.           | 4,8 Sek.         |

Diese Laufzeiten ergaben sich bei den folgenden *sort*-Anweisungen:

1. Spalten `vector<int>` und `vector<double>`

```
#include <algorithm> // notwendig für sort
using namespace std;
vector<T> v(Max); // T ist der Datentyp der Elemente von v
srand(0); // damit immer dieselben Werte sortiert werden
for (int i = 0; i<Max; i++) v[i] = rand();
sort(v.begin(), v.end()); // sortiert alle Elemente
```

2. Beim Aufruf von *sort* für C-Arrays werden die Grenzen des zu sortierenden Bereichs als Zeiger auf diese Arrayelemente übergeben (Zeigerarithmetik). Diese Syntax erscheint zunächst vielleicht etwas ungewöhnlich:

```
#include <algorithm> // notwendig für sort
T a[Max]; // T ist der Datentyp der Elemente von a
srand(0); // damit immer dieselben Werte sortiert werden
for (int i = 0; i<Max; i++) a[i] = rand();
sort(a, a + Max); // sortiert von Index 0 bis Max-1
```

Offensichtlich bieten Arrays und Vektoren (und andere Container der Standardbibliothek) im Wesentlichen dieselben Möglichkeiten zur Verwaltung von Daten. Vergleichen wir die wichtigsten Vor- und Nachteile:

**Vorteile** der Containerklassen gegenüber Arrays:

- Durch die automatische Speicherverwaltung und die zahlreichen Elementfunktionen ist die Verwaltung von Daten meist wesentlich einfacher und weniger fehleranfällig.
- Die Möglichkeit, Container einander zuzuweisen und als Parameter an Funktionen zu übergeben.
- Bei einem Vektor die Möglichkeit, mit *at* Indizes zu überprüfen.
- Die Elementfunktionen sind meist effizient (z.B. *push\_back* mit konstanter Komplexität). Da ein Array überhaupt keine Elementfunktionen anbietet, muss man bei jeder Funktion selbst darauf achten, ob sie effizient ist.

**Nachteile** von Containerklassen gegenüber Arrays:

- Gelegentlich haarsträubende Fehlermeldungen des Compilers. Mit ein wenig Routine kommt man aber damit zurecht. Dieser Nachteil kann ab C++20 mit concepts und ranges vermieden werden (siehe Abschnitt 14.6).
- Bei manchen Operationen können Iteratoren ungültig werden.

Da diese Nachteile kaum ins Gewicht fallen, sollte man immer Container-Klassen verwenden.

### 11.1.2 Iteratoren

Im ersten der letzten beiden Beispiele ist der Rückgabewert von *v.begin()* und *v.end()* ein sogenannter **Iterator**. Ein Iterator zeigt auf ein Element eines Containers und hat Ähnlichkeiten mit einem Zeiger auf ein Element eines Arrays. Insbesondere kann man mit dem Operator *\** das entsprechende Element des Containers ansprechen. Ein Iterator wird definiert wie in

```
vector<T>::iterator i; // ein Iterator i für einen Vektor
```

Für einen Iterator ist der Operator *++* definiert. Er bewirkt, dass der Iterator anschließend auf das nächste Element zeigt. Deshalb kann man alle Elemente eines Vektors folgendermaßen mit einem Iterator *i* durchlaufen:

```
for (vector<double>::iterator i = v.begin(); i != v.end(); i++)
    cout << *i << endl;
```

Da man auf die Elemente eines Vektors auch mit dem Indexoperator zugreifen kann, haben die nächsten Anweisungen denselben Effekt:

```
for (int i = 0; i < v.size(); i++) //oder size_t anstatt int
    cout << v[i] << endl;
```

Wir werden allerdings im nächsten Abschnitt andere Container kennen lernen, die keinen Indexoperator haben. Die Elemente eines solchen Containers muss man dann mit einem Iterator ansprechen.

Seit C++11 kann man den Datentyp des Iterators mit *auto* (siehe Abschnitt 2.3.3 und 8.1.11) vom Compiler bestimmen lassen. Das ist am einfachsten und seit C++11 üblich:

```
for (auto i = v.begin(); i != v.end(); i++)
    cout << *i << endl;
```

Der Rückgabewert von *v.begin()* zeigt immer auf das erste Element des Containers *v*, während *v.end()* auf die erste Position nach dem letzten Element zeigt. Deshalb wird als Abbruchbedingung beim Durchlaufen aller Elemente eines Bereichs immer wie oben die Bedingung

```
i != v.end()
```

verwendet. Auch die folgenden Elementfunktionen zum Einfügen und Löschen von Elementen verwenden Iteratoren:

```
iterator insert(iterator position, const T& x = T()); // fügt x vor position ein
iterator erase(iterator position); // löscht das Element an der Position position
iterator erase(iterator first, iterator last); // löscht alle Elemente im Bereich
```

Der **Rückgabewert** von *insert* ist ein Iterator, der auf das eingefügte Element im Container zeigt. Der von *erase* zeigt auf das Element, das auf das gelöschte folgt. Falls kein solches Element existiert, ist der Funktionswert *end()*.

Mit dem oben definierten Vektor *v* werden durch die folgenden Anweisungen jeweils ein Element am Anfang und am Ende eingefügt:

```
v.insert(v.begin(), 1);
v.insert(v.end(), 2);
```

Die nächsten beiden Anweisungen löschen das erste bzw. alle Elemente von *v*:

```
v.erase(v.begin());
v.erase(v.begin(), v.end());
```

Die Beschreibung von Elementbereichen wie in diesem letzten Beispiel ist charakteristisch für alle Container und Algorithmen der STL: Ein Paar von Iteratoren [*first*, *last*) beschreibt einen **Bereich** von **aufeinander folgenden Elementen eines Containers**, der mit *first* beginnt und alle Elemente bis ausschließlich *last* enthält, die man ausgehend von *first* mit dem Operator ++ erhält. Der zweite Wert *last* des Paares gehört also nicht mehr zum Bereich. Ein solches Wertepaar entspricht einem **halb offenen Intervall** [n,m) aus der Mathematik, das aus allen Werten *x* besteht, für die  $n \leq x < m$  gilt.

Die folgenden Beispiele gelten für beliebige Container und nicht nur für einen Vektor *v*:

1. Da *v.end()* immer auf die Position unmittelbar nach dem letzten Element des Containers *v* zeigt, stellt der Bereich *v.begin()*, *v.end()* immer **alle Elemente** des Containers *v* dar.
2. In einem leeren Container gilt *v.begin()*==*v.end()*. In einem nicht leeren Container hat **das letzte Element** die Position *v.end()*-1.
3. Wenn eine Funktion eine Parameterliste wie

```
void sort(RandomAccessIterator _First, RandomAccessIterator _Last);
```

hat, dann stehen die Iteratoren *\_First* und *\_Last* meist für einen solchen Bereich. Der Name *RandomAccessIterator* sagt etwas über die Anforderungen aus, die für den Iterator gelten müssen, damit *sort* aufgerufen werden kann. Diese sind bei einem *vector* und einem Array erfüllt, aber nicht beim Container *list*.

4. Alle Algorithmen der STL haben die Vorbedingung, dass die Argumente für einen Bereich [*first*,*last*) einen **zulässigen Bereich** darstellen. Ein solcher Bereich ist dadurch charakterisiert, dass man ausgehend von *first* mit ++ *last* erreicht. Paare wie

```
v.end(), v.begin()
v1.begin(), v2.end() // zwei verschiedene Container v1 und v2
```

sind kein zulässiger Bereich. Für solche Bereiche sind die Algorithmen der STL nicht definiert.

Zu einem Iterator  $i$  eines *vector* kann man einen Ganzzahlwert  $n$  addieren. Das Ergebnis  $i+n$  ist dann analog zur **Zeigerarithmetik** ein Iterator, der auf das Element zeigt, das sich  $n$  Positionen weiter befindet als das Element, auf das  $i$  zeigt.

### 1. Der Bereich

```
v.begin(), v.begin()+3
```

enthält die Positionen der ersten 3 Elemente

```
*(v.begin()), *(v.begin()+1), *(v.begin()+2),
```

aber nicht mehr die Position  $v.begin()+3$  des vierten Elements.

### 2. Mit einem Zeiger bzw. einem Array $a$ stellen die beiden Iteratoren

```
a, a+n
```

den Bereich der  $n$  Elemente  $*a, *(a+1), \dots, *(a+(n-1))$  (Zeigerarithmetik) bzw.  $a[0], a[1], \dots, a[n-1]$  dar. Die Analogie von Iteratoren und Zeigern sieht man auch an einem Beispiel wie

```
const char* p = "123";
const char* e = p + 3; //Zeiger auf das Element nach dem letzten
for (const char* i = p; i != e; i++)
    cout << *i << endl;
```

Hier ist  $e$  die Position nach dem letzten Element des Strings "123". Die Schleife entspricht weitgehend der schon oben vorgestellten Schleife, mit der alle Elemente des Containers  $v$  durchlaufen wurden:

```
for (auto i = v.begin(); i != v.end(); i++)
    cout << *i << endl;
```

### 3. Für Iteratoren ist ihre **Subtraktion** definiert. Sie ist wie in der Zeigerarithmetik der Ganzzahlwert mit der Differenz ihrer Positionen. So erhält man die Anzahl der Elemente eines Containers als die Differenz der Iteratoren *begin()* und *end()*:

```
v.size() = v.end()-v.begin() // Anzahl der Elemente
```

Alle Containerklassen haben Konstruktoren, bei denen man über Iteratoren einen Bereich angeben kann, dessen Elemente bei der Konstruktion des Containers in den Container kopiert werden.



Beispiel: `int a[5] = { 1,5,2,4,3 };  
vector<int> v(a, a + 5); // einfacher als 5 push_back`

Durch das Einfügen oder Löschen von Elementen können **Iteratoren** eines Containers **ungültig** werden. Das bedeutet aber nicht nur, dass der Iterator *pos* nach

```
auto pos = v.end()-1; // letztes Element
v.erase(pos);         // löscht das letzte Element
```

nicht mehr auf das letzte Element zeigt. Vielmehr hat ein ungültiger Iterator einen **unbestimmten** Wert. Deswegen erreicht man auch z.B. durch

```
pos--;
```

nicht, dass er anschließend wieder auf das letzte Element zeigt. Ein Iterator muss deshalb nach jeder solchen Operation wieder auf einen definierten Wert gesetzt werden. Oft sind dafür die Funktionswerte von *erase* oder *insert* geeignet, die auf das eingefügte Element zeigen bzw. auf das nächste nach dem gelöschten:

```
pos = v.insert(pos, x);
pos = v.erase(pos);
```

Beispiel: Um alle Elemente mit einem bestimmten Wert zu löschen, liegt auf den ersten Blick eine Schleife wie diese nahe:

```
vector<int> v;
// ...
for (auto i = v.begin(); i != v.end(); i++)
    if (*i == 17) v.erase(i);
```

Da hier aber der Iterator *i* nach dem Aufruf von *erase* ungültig werden kann, kann die Operation *i++* zu einer Zugriffsverletzung führen. Deshalb muss *i* nach dem Löschen auf einen definierten Wert gesetzt werden. Dafür bietet sich der Funktionswert von *erase* an, der auf das nächste Element nach dem gelöschten zeigt:

```
auto i = v.begin();
while (i != v.end())
    if (*i == 17) i = v.erase(i);
    else i++;
```

In Abschnitt 15.6 wird gezeigt, wie Elemente, die eine Bedingung erfüllen, mit den Algorithmen *remove* und *remove\_if* schneller gelöscht werden können, ohne dass das Problem mit den ungültigen Iteratoren auftritt.

### 11.1.3 Geprüfte Iteratoren (Checked Iterators)

Die mit Visual C++ ausgelieferte Version der Standardbibliothek enthält als Erweiterung gegenüber dem C++-Standard „Checked Iterators“ (geprüfte Iteratoren), die auf fehlerhafte

Operationen mit Iteratoren hinweisen. Diese sind seit Visual Studio 2012 als Voreinstellung in einer Debug-Konfiguration durch das Makro

```
#define _SECURE_SCL 1
```

aktiviert. Das bewirkt, dass fehlerhafte Operationen mit Iteratoren zum Teil bereits bei der Kompilation erkannt werden. Zur Laufzeit führt ein solcher Fehler zu einer Exception, falls das Makro

```
#define _SECURE_SCL_THROWS 1
```

wie in der Voreinstellung aktiviert ist. Mit

```
#define _SECURE_SCL_THROWS 0
```

führen solche Fehler dagegen zu einem Programmabbruch. Diese Prüfungen sind relativ zeitaufwendig. In einer Release-Konfiguration sind geprüfte Iteratoren nicht aktiviert. Die Voreinstellungen können geändert werden, indem diese Makros vor dem ersten `#include` einer Standardbibliothek bzw. unter *Projekt|Eigenschaften|Konfigurationseigenschaften|-C/C++|Präprozessor|Präprozessordefinitionen* gesetzt werden.

Die folgenden Beispiele verwenden diese Vektoren:

```
typedef vector<int> Container;
Container c_empty, c1(10), c2(10);
```

Die folgenden Operationen führen dann bei einer Debug-Konfiguration zu der angegebenen Fehlermeldung:

1. Die Dereferenzierung eines ungültigen Iterators führt zu der Fehlermeldung „vector iterator not dereferencable“:

```
Container::iterator i;
int x = *i;
```

2. Einen ungültigen Iterator erhält man auch durch das Einfügen oder Löschen von Elementen. Mit den folgenden Anweisungen erhält man dieselbe Fehlermeldung wie im ersten Beispiel:

```
Container::iterator i = c2.begin();
c2.insert(c2.begin(), '!');
// i wurde durch insert ungültig
int x = *i;
```

3. Übergibt man einem Algorithmus einen ungültigen Iteratorbereich, führt das zu der Fehlermeldung „invalid iterator range“:

```
copy(c1.begin() + 10, c1.begin(), c2.begin());
```

4. Ein ungültiger Iteratorbereich mit Iteratoren aus verschiedenen Containern führt zu der Fehlermeldung „vector iterators incompatible“:

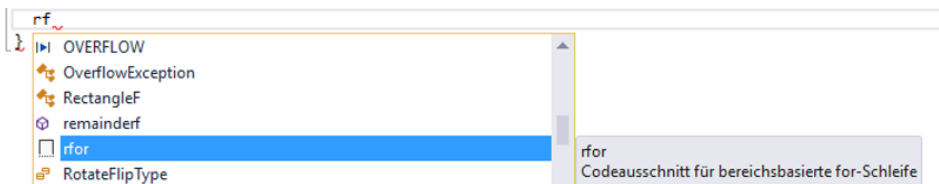
```
copy(c1.begin(), c2.end(), c2.begin());
```

#### 11.1.4 Die bereichsbasierte *for*-Schleife

Seit C++11 kann man mit der sogenannten **bereichsbasierten *for*-Schleife** („range-based for statement“) alle Elemente eines Arrays oder Containers etwas einfacher als mit Iteratoren durchlaufen. Dabei gibt man in der Klammer vor dem Doppelpunkt eine Variablendefinition an (das ist dann die Laufvariable), und nach dem Doppelpunkt den Container: *for* (*for-range-declaration* : *expression*) *statement*

Die Laufvariable nimmt dann ausgehend vom ersten bis zum letzten Element des Containers der Reihe nach alle Werte aus dem Container an. Gegenüber einer gewöhnlichen *for*-Schleife hat sie den Vorteil, dass man die Obergrenze nicht versehentlich falsch angeben kann.

Eine bereichsbasierte *for*-Schleife kann man mit einem Code-Ausschnitt erzeugen lassen. Nach dem Eintippen von „rf“ wird dieser angeboten



und nach dem Drücken der Tab-Taste in den Quelltext eingefügt:

```
for (auto& i : v)
{
}
}
```

Den Datentyp der Laufvariablen kann man explizit angeben oder mit *auto* vom Compiler aus dem Datentyp der Elemente des Containers ableiten lassen. Wenn dieser Datentyp kein Referenztyp ist, wird jedes Element im Container in die Laufvariable kopiert. Diese Kopien können zu längeren Laufzeiten als mit Referenzen führen.

Beispiel: Alle diese *for*-Schleifen summieren die Werte im Container *c* auf:

```
vector<int> c = { 1, 3, 7 };
int sum = 0;

for (const auto& i : c) sum += i; // konstante Referenz
for (auto& i : c) sum += i;      // Referenz
for (auto i : c) sum += i;      // Wert

for (const int& i : c) sum += i; // Datentyp explizit
for (int& i : c) sum += i;      //              angeben
for (int i : c) sum += i;
```

```
for (int i = 0; i < c.size(); i++) // klassische for-
    sum += c[i];                // Schleife
```

Wenn man die Werte im Container verändern will, muss der Datentyp der Laufvariablen eine Referenz sein. Mit einer konstanten Referenz kann man dokumentieren und sicherstellen, dass die Werte nicht verändert werden.

Beispiel: Die Werte im Container `c` werden verdoppelt:

```
for (auto& i : c)
    i *= 2;
```

Da bei größeren Datentypen eine Laufvariable eines Referenztyps schneller sein kann, wird grundsätzlich ein Referenztyp empfohlen. In der Praxis sind **`auto&`** oder **`const auto&`** üblich:

| Benchmarks Visual Studio 2019.5,<br>x64, Release /O2, N=1'000'000 | vector<int> v | vector<string> v |
|-------------------------------------------------------------------|---------------|------------------|
| <i>for (auto i:v)</i>                                             | 0,003 Sek.    | 0,40 Sek.        |
| <i>for (const auto&amp; i : v)</i>                                | 0,003 Sek.    | 0,003 Sek.       |
| <i>for (int i=0; i&lt;v.size(); i++)</i>                          | 0,003 Sek.    | 0,003 Sek.       |

Bei diesen Laufzeitmessungen wurden  $N=1'000'000$  *int*-Werte summiert. In Spalte 2 waren es die Werte `vi[i]` aus einem `vector<int>` `vi`, und in Spalte 3 die Werte `vs[i].length()` aus einem `vector` mit Strings der Länge 1000.--

Die bereichsbasierte *for*-Schleife funktioniert auch mit C-Arrays. Dazu leitet der Compiler die Anzahl der Elemente aus der Definition des Arrays ab. Mit dynamischen Arrays funktioniert sie aber nicht, da der Compiler die Größe des Arrays nicht bestimmen kann.

Beispiel: Mit einem C-Array geht die bereichsbasierte *for*-Schleife:

```
int a[7] = { 1,2,3 };
for (const auto& i : a)
    sum = sum + i;
```

Mit einem dynamischen Array erhält man eine Fehlermeldung des Compilers:

```
int* d = new int[7];
for (const auto& i : d) // Fehler: keine begin-Funktion
    sum = sum + i;     // gefunden
```

Anstelle eines Containers kann man auch eine Initialisierungsliste angeben. Dann wird die Anweisung mit allen Werten aus der Liste ausgeführt.

Beispiel: Wenn man eine Anweisung für bestimmte Werte ausführen will, musste man die Anweisung früher für jeden Wert ins Programm schreiben:

```
f(3);
f(5);
f(13);
f(21);
```

Mit einer Initialisierungsliste und einer bereichsbasierten *for*-Schleife geht das etwas einfacher:

```
for (const auto& i : { 3, 5, 13, 21})
    f(i);
```

Für einen Ausdruck *v*, dessen Datentyp eine Klasse ist (also z.B. ein Container), wird die bereichsbasierte *for*-Schleife

```
for (auto elem : v)
```

vom Compiler im Wesentlichen wie die folgenden Anweisungen behandelt:

```
auto _end = v.end();
for (auto _begin = v.begin(); _begin != _end; ++_begin)
{
    elem = *_begin;
    statement
}
```

Da hier *end()* nur einmal ausgewertet wird, ist diese Schleife schneller als

```
for (auto _begin = v.begin(); _begin != v.end(); ++_begin)
```

Falls *v* keine Elementfunktionen mit dem Namen *begin* und *end* enthält, sucht der Compiler nach globalen Funktionen mit diesem Namen, denen man den Container übergeben kann. Die ersten beiden Zeilen werden dann zu

```
auto _end = end(v);
for (auto _begin = begin(v); _begin != _end; ++_begin)
```

Falls *v* ein Array mit *Max* Elementen ist, werden die ersten beiden Zeilen zu

```
for (auto _begin = v; _begin != v + Max; ++_begin)
```

Deshalb steht die bereichsbasierte *for*-Schleife für jede Klasse zur Verfügung, die Elementfunktionen *begin()* und *end()* enthält, für deren Rückgabotyp der Operator *++* definiert ist. Das kann auch eine selbstdefinierte Klasse sein. Eine eigene Klasse *C* kann man einfach dadurch für die bereichsbasierte *for*-Schleife befähigen, indem man in *C* Elementfunktionen

```
begin()
end()
```

oder globale Funktionen (das sind dann meist *friend*-Funktionen der Klasse)

```
begin(C&)
end(C&)
```

definiert.

Beispiel: Die Klasse

```
class MeinContainer
{ // sehr einfach, nur zur Illustration
  vector<int> data;
public:
  vector<int>::iterator begin()
  {
    return data.begin();
  }
  vector<int>::iterator end()
  {
    return data.end();
  }
};
```

kann man in einer bereichsbasierten *for*-Schleife verwenden:

```
MeinContainer c;
int sum;
for (const auto& i : c)
  sum = sum + i;
```

### 11.1.5 Iteratoren und die Algorithmen der Standardbibliothek

Zur Standardbibliothek gehören zahlreiche **Algorithmen** für Container. Sie stehen nach

```
#include <algorithm> // oder import std.core; (siehe Abschnitt 2.13)
```

im Namensbereich *std* zur Verfügung. Diese Algorithmen sind so entworfen, dass sie sowohl mit den Containerklassen der STL als auch mit C-Arrays aufgerufen werden können. Deshalb sind diese Algorithmen auch keine Elementfunktionen der Container-Klassen, sondern Funktions-Templates siehe Abschnitt 14.1, die wie gewöhnliche globale Funktionen aufgerufen werden können.

Im Folgenden werden zunächst einige Algorithmen vorgestellt, die nur Iteratoren als Parameter haben. Vielen weiteren Algorithmen kann man auch Funktionen übergeben. Da diese oft am besten in Form von Lambda-Ausdrücken übergeben werden, folgen diese Algorithmen dann in Kapitel 0 nach der Vorstellung von Lambda-Ausdrücken.

Die folgenden Beispiele verwenden die Container *a* (ein Array) und *v* (einen *vector*):

```
typedef int T; // Diese Beispiele sind nicht auf int beschränkt
const int Max = 10;
vector<T> v(Max); // reserviere Platz für max Elemente
T a[Max];        // T ist der Datentyp der Elemente
```

Mit *equal* kann man prüfen, ob zwei Bereiche dieselben Elemente enthalten:

```
bool equal(InputIterator1 first1, InputIterator1 last1, InputIterator2 first2);
```

*equal* vergleicht *first1* mit *first2*, *first1*+1 mit *first2*+1 usw. Deshalb müssen auf das Argument für *first2* mindestens *last1*–*first1* Elemente folgen.

```
if (std::equal(a, a + Max, v.begin())) ...
```

Die Algorithmen *copy* und *equal* haben für Arrays die Funktionalität eines Zuweisungsoperators bzw. einer Prüfung auf Gleichheit.

Mit *find* kann man nach einem Wert in einem Container suchen:

```
InputIterator find(InputIterator first, InputIterator last, const T& value);
```

Dieser Algorithmus ist als lineare Suche implementiert. Der Rückgabewert ist dann die Position des ersten Elements mit dem Wert *value* im Bereich [*first*, *last*). Falls das gesuchte Element nicht gefunden wurde, ist der Funktionswert das Argument für den zweiten Parameter *last*:

```
vector<T>::iterator p1 = std::find(v.begin(), v.end(), 7); // oder
                                                            mit auto

if (p1 != v.end()) cout << *p1 << endl;
else cout << "nicht gefunden" << endl;
```

Die Bedeutung einiger STL-Algorithmen hat seit der Einführung der bereichsbasierten *for*-Schleife nachgelassen. Mit dieser Schleife kann man Algorithmen wie *find* oder *equal* einfach selbst formulieren:

```
bool gefunden = false; // im Wesentlichen wie find
T result = 0;
for (const auto& i : v)
{
    if (i == 7)
    {
        gefunden = true;
        result == i;
    }
}
```

Trotzdem können die Algorithmen der STL vorteilhaft sein: Sie sind oft kürzer, und ihr Name bringt oft expliziter als eine selbstgeschriebene Schleife zum Ausdruck, um was es geht.

## Der *sort*-Algorithmus

```
template<class RandomAccessIterator>
void sort(RandomAccessIterator first, RandomAccessIterator last);
```

sortiert die Elemente im Bereich  $[first, last)$  mit einer Variante des Quicksort: Dabei werden zwei Elemente mit dem Operator  $<$  verglichen. Damit diese Variante von *sort* verwendet werden kann, muss dieser Operator für den Datentyp der Elemente definiert sein. Weiteren Varianten von *sort* (siehe Abschnitt 15.8.2) ermöglichen verschiedene Sortierfolgen, da ihnen die Vergleichsfunktion übergeben werden kann.

Beispiel: `vector<int> v = { 1,5,2,3,4,6,7 };  
std::sort(v.begin(), v.end()); // v={1,2,3,4,5,6,7}`

## Der Algorithmus

```
OutputIterator copy(InputIterator first, InputIterator last, OutputIterator result)
```

kopiert die Elemente aus dem Bereich  $[first, last)$  in den Bereich der *last*–*first* Elemente ab *result*. Sein Ergebnis entspricht dem der Anweisungen:

```
while (first != last) *result++ = *first++;
```

Da *copy* keine Elemente in den Zielbereich einfügt, müssen die Elemente in diesem Bereich vor dem Aufruf von *copy* existieren. Da die Anforderungen für einen *InputIterator* für die Elemente des Vektors *v* und für einen Zeiger auf die Elemente des Arrays *a* erfüllt sind, können nicht nur Vektoren, sondern auch Arrays und nullterminierte Strings mit *copy* kopiert werden:

```
std::copy(v.begin(), v.end(), a); // kopiert v nach a
```

## Aufgaben 11.1.5

1. Verwenden Sie für die Aufgaben in a) bis c) geeignete Algorithmen der STL. Um den Aufwand für die Ein- und Ausgabe der Werte bei dieser Aufgabe klein zu halten, können sie hart kodierte Arrays verwenden und die Ergebnisse im Debugger anschauen.
  - a) Sortieren Sie ein Array mit 10 Werten des Datentyps *int*. Geben Sie alle Werte des Arrays nach dem Sortieren aus.
  - b) Kopieren Sie alle Elemente eines Arrays in ein anderes, das genügend groß ist.
  - c) Prüfen Sie, ob zwei Arrays dieselben Elemente haben.
2. Schreiben Sie eine Funktion mit den folgenden Fehlern
  - Dereferenzierung eines ungültigen Iterators, der
    - a) nie initialisiert wurde
    - b) Zugriff auf das erste Element eines leeren Vektors
    - c) der ungültig wurde (z.B. nach *insert*)
    - d) Zugriff auf ein Element, das auf das letzte folgt



- Aufruf eines STL-Algorithmus (z.B. *copy*) mit Iterator-Argumenten *first* und *last*, die kein zulässiger Bereich sind, z.B.
  - e) mit Iteratoren desselben Typs aus verschiedenen Containern
  - f) mit Iteratoren, bei denen *last* nicht mit einer Folge von ++-Operationen ausgehend von *first* erreicht werden kann

und beobachten Sie, welche Fehler angezeigt werden.

- 1) bei einer Debug-Konfiguration
- 2) bei einer Release-Konfiguration

### 11.1.6 Die Speicherverwaltung bei Vektoren $\Theta$

Ein *vector* reserviert den für neue Elemente notwendigen Speicher automatisch immer dann, wenn der bisher reservierte Speicher nicht mehr ausreicht. Damit der Zeitaufwand für die Reservierung von Speicherplatz nicht mit jedem neuen Element anfällt, wird meist mehr Speicher reserviert als nur der für das nächste Element. Die Elementfunktion *capacity* gibt die Anzahl der Elemente zurück, die der Container aufnehmen kann, ohne dass neuer Speicher reserviert werden muss:

```
size_type capacity() const
```

Mit *max\_size* erhält man die maximale Anzahl von Elementen, die der Container überhaupt aufnehmen kann:

```
size_type max_size() const;
```

Wenn man im Voraus weiß, wie viele Elemente im Lauf der Zeit anfallen, kann man den für diese Elemente notwendigen Speicherplatz mit *reserve* reservieren und so den Zeitaufwand für die wiederholte Anforderung von Speicherplatz reduzieren:

```
void reserve(size_type n);
```

Die Funktion *reserve* darf nicht mit dem Konstruktor mit einem Ganzzahlargument verwechselt werden, der die angegebene Anzahl von Elementen im *vector* ablegt: Durch *reserve* werden keine Elemente im *vector* abgelegt.

Beispiel: 

```
int Max = 1000;
vector<T> v2, v1(Max); // T: ein Datentyp
// v1.size()==1000, v1.capacity>=1000
v2.reserve(Max);
// v2.size() == 0, v2.capacity>=1000
```

Ein Vektor gibt den für seine Elemente reservierten Speicherplatz grundsätzlich nicht mehr frei. Das gilt insbesondere auch für den Aufruf von *reserve* mit einem kleineren Argument als *capacity()*. Auch durch *erase* wird der Speicherplatz für die gelöschten Elemente nicht freigegeben.

Beispiel: Mit den Vektoren des letzten Beispiels gelten nach den folgenden Anweisungen die danach als Kommentar angegebenen Bedingungen:

```
v1.reserve(0);
// v1.size() ==1000, v1.capacity>=1000
v1.clear(); // wie v1.erase(v1.begin(),v1.end());
// v1.size()==0, v1.capacity>=1000
```

Um den nicht benötigten Speicherplatz eines Vektors wieder freizugeben, musste man sich vor C++11 mit dem „Trick“ behelfen, dass man den Vektor in einen anderen, leeren Vektor kopiert. Dabei wird im anderen Vektor nur der Speicherplatz für die benötigten Elemente reserviert. Vertauscht man dann die beiden Vektoren, übernimmt der ursprüngliche Vektor die Kapazität für die tatsächlich enthaltenen Elemente.

Beispiel: Nach dem Aufruf der Funktion

```
void ShrinkToFit(vector<int>& v)
{
    vector<int> tmp(v); // tmp ist eine Kopie von v
    v.swap(tmp);        // vertausche v und tmp
}
```

mit dem Argument `v1` aus dem letzten Beispiel hat `v1` die *capacity* 0:

```
ShrinkToFit(v1);
// v1.size()==0, v1.capacity>=0
```

In C++11 steht für *vector*, *deque* und *string* die Elementfunktion

```
void shrink_to_fit();
```

zur Verfügung, die den Speicherbedarf auf die tatsächliche Anzahl der Elemente reduziert. Dabei werden alle Zeiger und Iteratoren ungültig.

Das Ergebnis der Elementfunktion

```
void resize(size_type sz, T c = T());
```

ist im C++-Standard folgendermaßen beschrieben:

```
if (sz > size())    insert(end(), sz - size(), c);
else if (sz < size()) erase(begin() + sz, end());
else;              //do nothing
```

Deshalb wird auch durch diese Funktion kein Speicherplatz freigegeben, obwohl man das aufgrund ihres Namens eventuell erwarten könnte.

Der Speicherbereich für die Elemente eines Vektors ist wie der für die Elemente eines Arrays zusammenhängend. Deshalb gilt für alle  $0 \leq n < v.size()$

```
&v[n] == &v[0] + n
```

Dieser Ausdruck darf aber nicht mit `&v + n` verwechselt werden: Das erste Element eines Vektors kann eine andere Adresse haben als der Vektor.

Ein Vektor `vector<bool>` (mit Elementen des Datentyps `bool`) unterscheidet sich von Vektoren mit Elementen anderer Datentypen dadurch, dass möglichst viele (also 8) Werte in ein Byte gepackt werden. Deswegen gilt die Identität für `&v[n]` für solche Vektoren nicht. Außerdem gelten einige weitere Einschränkungen.

### 11.1.7 Mehrdimensionale Vektoren $\Theta$

Vektoren, deren Elemente wieder Vektoren sind, werden als mehrdimensionale Vektoren oder Matrizen bezeichnet. Zwei- und dreidimensionale Vektoren mit Elementen des Datentyps `T` erhält man mit Definitionen wie

```
vector<vector<T>> m2; // zweidimensionaler Vektor
vector<vector<vector<T>>> m3; // dreidimensionaler Vektor
```

Die Elemente eines mehrdimensionalen Vektors `m` kann man mit einem mehrfachen Indexoperator oder der Elementfunktion `at` ansprechen:

```
m2[i][j]; // wie bei einem mehrdimensionalen Array
m2.at(i).at(j)
```

Durch die Definition

```
vector<vector<T>> m2;
```

erhält man einen zweidimensionalen Vektor `m2`, der allerdings noch keine Elemente enthält. Analog zu den Definitionen von `v3` und `v4` aus Abschnitt 11.1.1 erhält man mit

```
int n = 10, m = 20;
vector<vector<T>> m2a(n);
```

einen Vektor `m2a` mit `n` Elementen, die alle leere Vektoren sind. Analog zu `v4` erhält man mit

```
vector<vector<T>> m2b(n, vector<T>(m));
```

einen zweidimensionalen Vektor `m2b` mit `n` Elementen, die jeweils Vektoren mit `m` Elementen sind. Der erste Index entspricht dann `n` und der zweite `m`:

```
for (int i = 0; i < n; i++)
    for (int j = 0; j < m; j++)
        m2b[i][j] = 0;
```

### Aufgabe 11.1.7

1. Schreiben Sie eine Funktion, die in einer Schleife nacheinander Elemente in einen Vektor ablegt und bei jeder Änderung der *capacity* die Anzahl der Elemente und die *capacity* ausgibt.

2. Definieren Sie eine Dreiecksmatrix mit  $n$  Zeilen, deren  $i$ -te Zeile  $i$  Spalten hat ( $i=1 \dots n$ ). Setzen Sie die Elemente am Rand dieser Matrix auf den Wert 1. Jedes Element im Inneren der Dreiecksmatrix soll die Summe der beiden Elemente aus der Zeile darüber sein, die links und über diesem Element stehen (Pascal Dreieck):

```

1
1 1
1 2 1
1 3 3 1
usw.

```

### 11.1.8 Gemeinsamkeiten und Unterschiede der sequenziellen Container

Die Standardbibliothek enthält neben *vector* weitere Container-Klassen, die ihre Daten in einer linearen Anordnung verwalten. Diese werden auch als **sequenzielle Container** bezeichnet. Sie unterscheiden sich durch ihre interne Organisation und durch die Ausführungszeit ihrer Operationen:

- Der Container ***list*** wird intern durch eine doppelt verkettete Liste implementiert (siehe Abschnitt 6.8). Beim Einfügen oder Löschen von Elementen in eine *list* werden diese in die Liste eingehängt und beim Löschen aus ihr ausgehängt. Daraus ergibt sich:
  - Die Ausführungszeit beim Einfügen und Löschen ist unabhängig von der Anzahl der Elemente in der Liste.
  - Allerdings besitzt *list* keinen Indexoperator, mit dem man ein Element über seine Position im Container adressieren kann.
  - Iteratoren eines *list*-Container werden beim Einfügen nie ungültig (siehe Seite 599).
  - Beim Löschen wird nur ein Iterator auf das gelöschte Element ungültig. Das ergibt sich daraus, dass bei diesen Operationen die Position der anderen Elemente des Containers nicht verändert wird.
- Eine ***forward\_list*** ist eine einfach verkettete Liste, die man nur von vorne nach hinten durchlaufen kann. Der Speicherplatzbedarf ist ein wenig kleiner als bei *list*.
- Der Container ***deque*** („double ended queue“) wird intern meist durch zwei oder mehr dynamisch erzeugte Arrays implementiert. Deshalb ist die Ausführungszeit für das Einfügen und Löschen von Elementen am Anfang und am Ende unabhängig von der Anzahl der Elemente. An anderen Positionen ist sie dagegen linear. Außerdem ist der Indexoperator definiert.

Diese Container stehen nach einer entsprechenden *#include*-Anweisung

```

#include <list>    // oder import std.core; (siehe Abschnitt 2.13)
#include <deque>

```

im Namensbereich *std* zur Verfügung.

Im C++-Standard wird empfohlen: im **Normalfall** einen ***vector*** zu wählen, da das oft der am besten geeignete Container ist. Falls man sich für einen anderen Container entscheidet, soll man das durch einen Kommentar begründen. Solche Gründe können sein:

- Wenn die Größe des Containers bereits bei der Kompilation bekannt ist und sich nicht ändert, kann ein ***array*** besser geeignet sein.

- Wenn viele Elemente in der Mitte des Containers eingefügt oder gelöscht werden, kann eine Liste (**list** oder **forward\_list**) besser geeignet sein.
- Wenn viele Elemente am Anfang oder am Ende in den Container eingefügt oder gelöscht werden, kann eine **deque** besser geeignet sein.

Der C++-Standard verlangt für viele Operationen nicht nur ein bestimmtes Ergebnis, sondern im Unterschied zu vielen anderen Bibliotheken auch Obergrenzen für ihre durchschnittliche Ausführungszeit. Die Anforderungen an den maximalen Zeitaufwand für eine Operation werden dabei immer auf die Anzahl der Elemente im Container bezogen und als **Komplexität** bezeichnet. Wenn der Zeitaufwand für eine Operation proportional zur Anzahl der Elemente im Container ist, bezeichnet man die Komplexität der Operation als linear. Wenn er dagegen von der Anzahl der Elemente des Containers unabhängig ist, bezeichnet man sie als konstant. Beim Auswahlort haben wir gesehen, dass seine Komplexität quadratisch ist. Die Komplexität des binären Suchens ist dagegen logarithmisch.

Die Komplexität der meisten Algorithmen fällt in eine der folgenden Kategorien:

| Komplexität       | n=1 | n=10 | n=100 | n=1000  |
|-------------------|-----|------|-------|---------|
| konstant          | 1   | 1    | 1     | 1       |
| logarithmisch     | 1   | 4    | 7     | 10      |
| linear            | 1   | 10   | 100   | 1000    |
| $n \cdot \log(n)$ | 1   | 40   | 700   | 10000   |
| quadratisch       | 1   | 100  | 10000 | 1000000 |

Diese Tabelle enthält ab der zweiten Spalte den Faktor, um den sich der Zeitaufwand gegenüber einem Container mit einem Element vervielfacht. Daraus kann man natürlich keine Aussagen über den absoluten Zeitaufwand ableiten. Im Einzelfall kann ein Algorithmus mit quadratischer Komplexität schneller sein als einer mit linearer Komplexität. Bei großen Werten von  $n$  ist die Komplexität aber der entscheidende Faktor für den Zeitaufwand einer Operation.

Für die sequenziellen Container sind unter anderem die folgenden Operationen definiert. Dabei stehen  $a$  und  $b$  für Variablen, deren Datentyp eine Container-Klasse ist,  $p$  und  $q$  für Iteratoren und  $t$  für ein Element eines Containers:

| Ausdruck                   | Datentyp               | Bedeutung                                                    | Komplexität |
|----------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------|
| <code>a.begin()</code>     | Iterator               | Zeiger auf erstes Element                                    | konstant    |
| <code>a.end()</code>       | Iterator               | Zeiger auf das Element nach dem letzten                      | konstant    |
| <code>a.size()</code>      | <code>size_type</code> | Anzahl der Elemente                                          | konstant    |
| <code>a.empty()</code>     | <code>bool</code>      | <code>a.size()==0</code>                                     | konstant    |
| <code>a.insert(p,t)</code> | Iterator               | fügt eine Kopie von $t$ vor $p$ ein                          | verschieden |
| <code>a.erase(p)</code>    | Iterator               | löscht das Element an Position $p$                           | verschieden |
| <code>a.erase(p,q)</code>  | Iterator               | löscht Elemente im Bereich $p, q$                            | verschieden |
| <code>a.clear()</code>     | <code>void</code>      | <code>a.erase(begin(),end())</code>                          | verschieden |
| <code>a==b</code>          | <code>bool</code>      | $a$ und $b$ haben gleich viel Elemente, die alle gleich sind | linear      |

|      |      |                        |        |
|------|------|------------------------|--------|
| a!=b | bool | !(a==b)                | linear |
| a<b  | bool | a lexikografisch vor b | linear |

Da viele Operationen in mehreren Containern verfügbar sind, lassen sich viele Aufgabenstellungen mit verschiedenen Containern lösen. Da in dieser Tabelle „Iterator“ für verschiedene Iterator-Kategorien stehen kann, stehen aber nicht alle Algorithmen für alle Container zur Verfügung.

Beispiel: Der globale Algorithmus *sort* steht für *list* nicht zur Verfügung. An seiner Stelle muss die **Elementfunktion** *sort* verwendet werden:

```
v.sort(); // sortiert die Liste v
```

Nach dem C++-Standard sind die folgenden Operationen nur für solche Container definiert, für die ihre **Ausführungszeit konstant** ist. Diese Container sind in der letzten Spalte aufgeführt:

| Ausdruck        | Datentyp | Bedeutung             | Container                                        |
|-----------------|----------|-----------------------|--------------------------------------------------|
| a.front()       | T&       | *a.begin()            | vector, list, deque, array, string, forward list |
| a.back()        | T&       | *--a.end()            | vector, list, deque, string, array               |
| a.push_front(x) | void     | a.insert(a.begin(),x) | list, deque, forward list                        |
| a.push_back(x)  | void     | a.insert(a.end(),x)   | vector, list, deque, string                      |
| a.pop_front()   | void     | a.erase(a.begin())    | list, deque, forward list                        |
| a.pop_back()    | void     | a.erase(--a.end())    | vector, list, deque, string                      |
| a[n]            | T&       | *(a.begin()+n)        | vector, deque, array, string                     |
| a.at(n)         | T&       | *(a.begin()+n)        | vector, deque, array, string                     |

Die nächste Tabelle enthält die Ausführungszeiten für das Einfügen von verschieden großen Elementen am Anfang und am Ende verschiedener Container.

| Benchmarks VS 2019.5, x64, /O2<br>Release 100.000 Operationen | vector      | deque      | list       |
|---------------------------------------------------------------|-------------|------------|------------|
| 1. push_back int                                              | 0,0003 Sek. | 0,006 Sek. | 0,025 Sek. |
| 2. push_back 100 Bytes                                        | 0,0180 Sek. | 0,028 Sek. | 0,028 Sek. |
| 3. push_back 1000 Bytes                                       | 0,19 Sek.   | 0,037 Sek. | 0,035 Sek. |
| 4. wie 3., mit reserve                                        | 0,040 Sek.  | –          | –          |
| 5. push_front int                                             | 0,60 Sek.   | 0,006 Sek. | 0,025 Sek. |
| 6. push_front 100 Bytes                                       | 32 Sek.     | 0,028 Sek. | 0,028 Sek. |

- Die Zeilen 1.-3. enthalten die Zeiten für das Einfügen von Elementen des Datentyps *int* sowie von 100 und 1000 Bytes großen Strukturen. Wie man sieht, ist das Einfügen von kleinen Elementen mit *push\_back* in einen *vector* schneller als in eine Liste, während bei größeren Elementen eine Liste schneller sein kann.
- Die Zeile 4 zeigt, dass ein *vector* die meiste Zeit für die Reservierung von Speicher benötigt. Wenn dieser im Voraus mit der Elementfunktion *reserve* reserviert wird, ist ein *vector* schneller als die anderen Container.

- Die Zeilen 5 und 6 zeigen, dass ein *vector* nicht verwendet werden sollte, um Elemente an anderen Positionen als am Ende einzufügen. Da ein *vector* kein *push\_front* hat, wurde *v.insert(v.begin(), x)* verwendet.

### 11.1.9 Die Container-Adapter *stack*, *queue* und *priority\_queue* Θ

Die sogenannten **Container-Adapter** sind Container, die andere Container zur Speicherung ihrer Elemente verwenden. Dazu gehören *stack*, *queue* und *priority\_queue*, die nach

```
#include <stack> // oder import std.core; (siehe Abschnitt 2.13)
#include <queue>
```

im Namensbereich *std* zur Verfügung stehen und folgendermaßen definiert werden können:

```
stack<T> s; // T ein Datentyp
queue<T> q;
priority_queue<T> pq;
```

Mit diesen Definitionen verwenden *stack* und *queue* einen *deque* zur Speicherung und *priority\_queue* einen *vector*.

Ein **Stack** hat die folgenden Elementfunktionen:

```
bool empty()           // true, falls der Stack leer ist, andernfalls false
size_type size()       // Anzahl der Elemente im Stack
value_type& top()       // das oberste Element
void push(const value_type& x) // legt das Argument auf den Stack
void pop()              // entfernt das oberste Element
```

Hier ist zu beachten, dass *pop* (im Unterschied zu vielen anderen Implementationen von Stacks) den Wert des obersten Elements nicht zurückliefert.

Alle Container-Adapter haben keine Iteratoren. Ein Zugriff auf die Elemente ist nur über die Funktion *top* möglich.

Legt man die Elemente  $e_1, e_2, \dots, e_n$  der Reihe nach mit *push* auf einen Stack, erhält man diese durch *n* *top*- und *pop*-Operationen in der umgekehrten Reihenfolge zurück, in der man sie auf den Stack gelegt hat. Deswegen bezeichnet man einen Stack auch als *last-in-first-out*-Struktur (LIFO).

Eine **Queue** hat bis auf *top* dieselben Funktionen wie ein Stack. Der Zugriff auf das erste bzw. letzte Element ist mit den folgenden Funktionen möglich:

```
value_type& front()
value_type& back()
```

Da man hier die Elemente mit *front* wieder in derselben Reihenfolge aus dem Container entfernen kann, in der man sie eingefügt hat, kann man mit einer *queue* eine *first-in-first-out*-Struktur (FIFO) realisieren.

Eine **Priority\_Queue** ordnet ihre Elemente in einer Reihenfolge an. Mit *top* wird dann immer das oberste Element in dieser Anordnung entnommen. Die Reihenfolge ergibt sich in

```
priority_queue<T> p; // T ist der Datentyp der Elemente
```

aus dem Vergleich der Elemente mit dem Operator „<“. Dieser Operator kann aber in der Definition durch einen anderen ersetzt werden:

```
priority_queue<T, vector<T>, greater<T>> p;
```

Die Laufzeit von *top* hat eine konstante Komplexität. Dafür dauert Einfügen und Löschen etwas länger (logarithmische Komplexität).

Beispiel: Die folgenden Anweisungen werden für die Container *stack* und *priority\_queue* übersetzt:

```
stack<string> p; // priority_queue<string> p; geht auch
p.push("Daniel");
p.push("Alex");
p.push("Kathy");
while (!p.empty())
{
    cout << p.top() << endl;
    p.pop();
}
```

Ersetzt man *p.top* durch *p.front*, kann man auch eine *queue* verwenden. Für die einzelnen Container werden die Werte dann in der folgenden Reihenfolge ausgegeben:

```
stack:           „Kathy“, „Alex“, „Daniel“ (LIFO)
priority_queue: „Kathy“, „Daniel“, „Alex“ (alphabetisch geordnet)
queue:          „Daniel“, „Alex“, „Kathy“ (FIFO)
```

### 11.1.10 Container mit Zeigern

Wenn ein Container Zeiger enthält, wird beim Löschen von Container-Elementen (z.B. mit *erase*) nur der Speicherbereich für die Zeiger freigegeben. Der Speicherbereich, auf den die Zeiger zeigen, wird dadurch nicht berührt und bleibt weiterhin reserviert. Wenn die Zeiger auf dynamisch erzeugte Variablen zeigen, ist ein Speicherleck die Folge:

```
vector<int*> v;
v.push_back(new int(17));
v.erase(v.begin()); // Speicherleck
```

Die zu einem Zeiger gehörenden Speicherbereiche müssen deshalb explizit wieder freigegeben werden:

```
for (auto i = v.begin(); i != v.end(); i++)
    delete *i;
```



Da beim Löschen eines *shared\_ptr* oder *unique\_ptr* (siehe Abschnitt 18) auch der Speicherbereich gelöscht wird, auf den er zeigt, muss man bei einem Container mit *shared\_ptr* Elementen den zugehörigen Speicherbereich nicht explizit freigeben. Deswegen sollte man nur smart pointer, aber keine gewöhnlichen Pointer auf einen dynamisch erzeugten Speicherbereich in einem Container ablegen.

## 11.2 Allokatoren und polymorphic memory resources

In der Voreinstellung reservieren die Container der Standardbibliothek ihren Speicher mit *new* und geben ihn mit *delete* wieder frei. Diese Aufrufe kosten Zeit und können zu einer Fragmentierung von Speicher führen. Mit den seit C++17 im Namensbereich *std::pmr* (polymorphic memory resources) verfügbaren Allokatoren können diese Nachteile oft vermieden werden. Das ist ein umfangreiches Thema, das hier nur kurz behandelt werden kann. Für eine umfassende Darstellung wird das Buch von Nicolai Josuttis: C++17 – The Complete Guide, Kapitel 29 empfohlen.

Im Folgenden werden die wichtigsten Möglichkeiten an Beispielen wie

```
void vector_with_heap_memory(int n)
{
    std::vector<std::string> container;
    for (int i = 0; i < n; ++i)
    { // Strings, die kürzer als 16 Zeichen sind, werden oft
      // auf dem Stack angelegt ("small string optimization" - SSO)
      container.push_back("keine small string Optimierung");
    }
    // arbeite mit dem container
}
```

gezeigt. Diese Beispiele verwenden

```
std::pmr::vector
```

Obwohl das auf den ersten Blick wie eine eigene *vector*-Klasse im Namensbereich *pmr* aussieht, ist es nichts anderes als die Klasse *std::vector* mit einem speziellen Allokator:

```
namespace pmr {
    template <class T>
    using vector = std::vector<T, polymorphic_allocator<T>>;
} // namespace pmr
```

Die Container der Standardbibliothek (außer *std::array*) sind so konstruiert, dass die Speicherverwaltung in einem Allokator gekapselt ist, der als Parameter übergeben wird. In der Voreinstellung ist das *std::allocator<T>*, der Speicher mit *new* anfordert und mit *delete* wieder frei gibt:

```
template<typename T, typename Allocator = std::allocator<T>>
class vector;
```

Wie für *vector* gibt es auch für alle anderen sequentiellen und assoziativen Container pmr-Varianten. Die Containerklassen aus *std::pmr* unterscheiden sich von denen aus dem Namensbereich *std* nur dadurch, dass anstelle von *std::allocator* der Allokator *polymorphic\_allocator* verwendet wird.

Die pmr-Klassen stehen erst seit C++17 zur Verfügung und werden nur selten eingesetzt. Deswegen werden gründliche Tests empfohlen.

Die folgenden Beispiele sind nicht auf *std::vector* beschränkt, sondern lassen sich auf beliebige sequentielle und assoziative Container übertragen.

#### 1. Mit der nach

```
#include <memory_resource>
```

verfügbaren Klasse *std::pmr::monotonic\_buffer\_resource* kann man einem Container Speicher zuordnen, der dann vom Container anstelle von Speicher auf dem Heap verwendet wird. Dadurch muss bei der Arbeit mit dem Container kein Speicher mit *new* angefordert und mit *release* wieder freigegeben werden.

Dieser Speicher wird im Konstruktor

```
monotonic_buffer_resource(void* buffer, std::size_t buffer_size);
```

mit seiner Adresse und Größe angegeben. Das kann z.B. ein Array sein, das auf dem Stack angelegt wurde:

```
void vector_with_stack_memory(int n)
{ // Der einzige Unterschied sind die ersten drei Zeilen:
  std::array<std::byte, 100'000> memory; // oder char statt byte
  // verwende memory als Speicher für den vector und die strings:
  std::pmr::monotonic_buffer_resource pool{ memory.data(),
                                             memory.size() };

  std::pmr::vector<std::pmr::string> container{ &pool };

  // arbeite mit dem container
  for (int i = 0; i < n; ++i)
  {
    container.push_back("keine small string Optimierung");
  }
}
```

Da hier sowohl als Container *std::pmr::vector* als auch für die Elemente *std::pmr::string* angegeben wird, verwenden sowohl der *vector* als auch die *string*-Elemente den Speicherpool von *memory*.

Falls der Speicher von *memory* für alle Operationen mit dem Container ausreicht, findet kein einziges *new* und *delete* mehr statt. Falls er aber nicht ausreicht, wird der zusätzlich notwendige Speicher mit *new* und *delete* auf dem Heap angefordert. Siehe dazu auch 4.

Mit einem new-tracker (siehe Abschnitt 6.7.2) kann man sich davon überzeugen, dass bei der Arbeit mit *pmr*-Containern tatsächlich keine Aufrufe von *new* und *delete* stattfinden.

Stroustrup berichtet in „A tour of C++“, Kap. 13.6 von einer Anwendung, bei der die Umstellung auf polymorphe Memory-Ressourcen (im Wesentlichen nur wie oben die ersten drei Zeilen geändert) den Speicherbedarf von 6 Gigabyte auf 300 Megabyte reduziert hat.

2. Anstelle von lokal definiertem kann auch global definierter Speicher verwendet werden. Da der Speicher für globale Variablen beim Start des Programms reserviert wird, kann das nicht zu einem Stack overflow führen.

```
std::array<std::byte, 100'000> memory;

void vector_with_global_memory(int n)
{ // ohne die erste Zeile
  // std::array<std::byte, 100'000> memory;
  // alles andere gleich wie vector_with_stack_memory
  std::pmr::monotonic_buffer_resource pool{ memory.data(),
                                             memory.size() };
  std::pmr::vector<std::pmr::string> container{ &pool };

  // arbeite mit dem container
} // gibt den Speicher von pool in memory frei
```

Auch ein *std::string* kann mit globalem Speicher definiert werden:

```
std::array<std::byte, 100> str_buf; // stringBuffer
std::pmr::monotonic_buffer_resource str_res(str_buf.data(),
                                             str_buf.size(), std::pmr::null_memory_resource());

void static_string()
{ // ein string, der statischen Speicher verwendet
  std::pmr::string short_string(&str_res);
  // arbeite mit dem short_string
}
```

Hier (und auch bei einem *vector*) muss man wirklich genügend Speicher reservieren. Ein Aufruf wie *reserve* kann z.B. mehr Speicher anfordern als angegeben wird.

Das „monotonic“ im Namen von *monotonic\_buffer\_resource* kommt daher, dass der reservierte Speicher monoton wächst: Eine *monotonic\_buffer\_resource* wird immer beim Verlassen des Gültigkeitsbereichs als Ganzes freigegeben. Die Freigabe von einzelnen Elementen des Containers löscht diese Elemente zwar aus dem Container und ruft ihren Destruktor auf. Der Speicher der *monotonic\_buffer\_resource* wird dadurch aber nicht (wie mit *delete*) freigegeben. Dadurch wird eine Fragmentierung des Speichers vermieden.

3. Da eine *monotonic\_buffer\_resource* beim Verlassen des Gültigkeitsbereichs freigegeben wird, kann der Speicher wiederverwendet werden. Das kann den Speicherbedarf im

Vergleich zu *new* und *delete* reduzieren und die Speicherverwaltung vereinfachen und beschleunigen:

```
void reuse_memory(int n)
{ // verwende das globale memory in einer anderen Funktion
  std::pmr::monotonic_buffer_resource pool{ memory.data(),
                                             memory.size() };

  std::pmr::list<std::pmr::string> container{ &pool };
  // arbeite mit dem container
}
```

Das gilt auch dann, wenn kein memory pool angegeben wird. Dann werden die einzelnen Speicherbereiche mit *new* angefordert, aber nicht mit *delete* freigegeben. Die *monotonic\_buffer\_resource* wird erst beim Verlassen des Blocks als Ganzes freigegeben:

```
void vector_with_no_preallocated_memory(int n)
{
  std::pmr::monotonic_buffer_resource pool;
  std::pmr::vector<std::pmr::string> container{ &pool };
  // arbeite mit dem container
}
```

Ein pool kann auch von mehreren Containern gemeinsam verwendet werden:

```
std::pmr::monotonic_buffer_resource pool{ memory.data(),
                                             memory.size() };

std::pmr::vector<int> v1{ &pool };
std::pmr::vector<std::pmr::string> v2{ &pool };
```

4. Wie schon in 1. erwähnt wurde, verwendet ein pmr-Container den memory pool, solange dieser noch freien Platz hat. Falls darüber hinaus Speicher notwendig ist, wird dieser mit *new* und *delete* angefordert.

Es gibt aber Anwendungen, bei denen die damit verbundene Speicherfragmentierung nicht akzeptiert werden kann. Dann kann man mit dem Argument

```
std::pmr::null_memory_resource()
```

bei der Definition einer *monotonic\_buffer\_resource*

```
void Exception_auslösen_falls_Speicher_nicht_reicht(int n)
{ // verwende memory in einer anderen Funktion
  std::pmr::monotonic_buffer_resource pool
  {memory.data(),memory.size(),std::pmr::null_memory_resource()};
  std::pmr::list<std::pmr::string> container{ &pool };
  // arbeite mit dem container
}
```

erreichen, dass eine Exception ausgelöst wird, wenn Speicher benötigt, aber im memory pool nicht mehr verfügbar ist. So kann man feststellen, ob der memory pool zu klein ist.

5. Die folgenden Benchmarks zeigen, dass pmr-Container schneller sein können als ein gewöhnlicher Container, bei dem oft *new* und *delete* aufgerufen wird. Dabei wurde gemessen, wie lange 100.000 *push\_back*-Aufrufe mit *int*, 100 und 1000 Bytes dauern:

| Benchmarks VS 2019.5, x64, /O2<br>Release 100.000 Operationen | <i>pmr::vector</i> /<br><i>std::vector</i> | <i>pmr::deque</i> /<br><i>std::deque</i> | <i>pmr::list</i> /<br><i>std::list</i> |
|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|
| 1. <i>push_back</i> int                                       | 0,3 / 0,3 ms                               | 0,4 / 1 ms                               | 0,7 / 4 ms                             |
| 2. <i>push_back</i> 100 Bytes                                 | 15 / 18 ms                                 | 2 / 6 ms                                 | 2 / 6 ms                               |
| 3. <i>push_back</i> 1000 Bytes                                | 150 / 200 ms                               | 35 / 20 ms                               | 35 / 15 ms                             |
| 4. wie 3., mit <i>reserve</i>                                 | 40 / 40 ms                                 | –                                        | –                                      |

| Benchmarks gcc 9.2, x64, -O3,<br>100.000 Operationen | <i>pmr::vector</i> /<br><i>std::vector</i> | <i>pmr::deque</i> /<br><i>std::deque</i> | <i>pmr::list</i> /<br><i>std::list</i> |
|------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|
| 1. <i>push_back</i> int                              | 0,3 / 0,4 ms                               | 0,2 / 0,4 ms                             | 0,5 / 25 ms                            |
| 2. <i>push_back</i> 100 Bytes                        | 8 / 10 ms                                  | 2 / 7 ms                                 | 2 / 27 ms                              |
| 3. <i>push_back</i> 1000 Bytes                       | 100 / 100 ms                               | 40 / 40 ms                               | 40 / 40 ms                             |
| 4. wie 3., mit <i>reserve</i>                        | 40 / 40 ms                                 | –                                        | –                                      |

Die Geschwindigkeitsvorteile sind aber bei einem *vector* gering. Bei einer *list*, bei der der Speicher bei jedem Einfügen eines Elements angefordert werden muss, können sie aber groß sein. Ein *vector* mit *reserve* ist aber trotzdem oft am schnellsten.

Vor C++17 war das Schreiben von eigenen Allokatoren schwierig und fehleranfällig. In C++17 wurde das stark vereinfacht. Die Allokatoren der pmr sind alle von der abstrakten Basisklasse *memory\_resource* abgeleitet. Diese besteht nur aus wenigen Funktionen. Falls Sie eigene Allokatoren entwickeln wollen, müssen Sie „nur“ eine eigene Klasse ableiten, in der die Funktionen *do\_allocate*, *do\_deallocate* und *do\_is\_equal* implementiert werden.

Pablo Halpern, einer der maßgeblichen Autoren der pmr, hat das auf seinem Vortrag auf der CppCon 2017 (<https://www.youtube.com/watch?v=v3dz-AKOVl8>, <https://github.com/phalpern>) mit dieser Graphik dargestellt:

| Allocators got a whole lot easier                                      |                                                        |                                                 |                                             |
|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Task                                                                   | C++98/C++03                                            | C++11/C++14                                     | C++17 polymorphic_allocator<byte>           |
| Use an allocator                                                       | MEDIUM<br>viral templates                              | MEDIUM<br>viral templates                       | EASY                                        |
| Create an allocator                                                    | MEDIUM<br>Lots of boilerplate,<br>non-portable state   | EASY                                            | EASY<br>just derive from<br>memory_resource |
| Create a scoped<br>allocator                                           | IMPOSSIBLE                                             | MEDIUM-EASY<br>alias scoped_allocator_adaptor   | EASY<br>polymorphic_allocator<br>is scoped  |
| Create a new<br>allocator-aware<br>container                           | MEDIUM<br>rebinding needed,<br>ignore allocator state? | HARD<br>propagation traits,<br>allocator_traits | EASY<br>skip C++11 complexity               |
| Pablo Halpern, 2017 (CC BY 4.0) <span>9/24/2019</span> <span>21</span> |                                                        |                                                 |                                             |

## 11.3 Assoziative Container

Die Standardbibliothek enthält die **assoziativen Container** *set*, *multiset*, *map* und *multimap*. Sie verwalten ihre Elemente sortiert nach einem Schlüsselwert in einem balancierten Binärbaum und ermöglichen so einen schnellen Zugriff (meist mit logarithmischer Komplexität) auf diese. Die *unordered*-Varianten (siehe Abschnitt 11.3.4) berechnen die Position der Daten zu einem Schlüsselwert (meist mit konstanter Komplexität).

In Abschnitt 6.9 wurde gezeigt, wie man solche Binärbäume konstruieren kann. Allerdings sind die assoziativen Container aufgrund ihrer ausgefeilten internen Struktur meist effizienter und einfacher zu verwenden als selbstgestrickte Binärbäume. Deshalb besteht normalerweise keine Notwendigkeit, selbst Binärbäume zu schreiben.

### 11.3.1 Die Container *set* und *multiset*

Die Containerklassen *set* und *multiset* stehen nach

```
#include <set> // oder import std.core; (siehe Abschnitt 2.13)
```

im Namensbereich *std* zur Verfügung. Container dieser Datentypen können wie in

```
set<T> s;           // T: Der Datentyp der Elemente
multiset<T> ms;
```

definiert werden und stellen Mengen im Sinn der Mathematik dar. Die Container *set* und *multiset* unterscheiden sich im Wesentlichen nur dadurch, dass ein Wert in einem *set* nur einmal enthalten sein kann, während ein *multiset* einen Wert mehrfach enthalten kann.

Zum Einfügen und Löschen von Elementen stehen die Elementfunktionen

```
pair<iterator,bool> insert(const value_type& x); // bei einem set
iterator insert(const value_type& x); // bei einem multiset
size_type erase(const key_type& x);
```

zur Verfügung. Der Rückgabewert von *insert* ist bei einem *set* ein *pair*, dessen Element *first* ein Iterator auf die eingefügte Position ist. *second* ist ein boolescher Wert, der anzeigt, ob das Argument eingefügt wurde.

Beispiel: Übergibt man *insert* ein bereits vorhandenes Element ein, wird es bei einem *set* nicht eingefügt, aber bei einem *multiset* doch:

```
std::set<int> s = { 1 };
std::multiset<int> m = { 1 };
auto r1 = s.insert(1); // s.size() = 1
auto r2 = m.insert(1); // m.size() = 2
bool eingefuegt1 = r1.second; // false
```

Mit der in allen assoziativen Containern definierten Elementfunktion

```
iterator find(const key_type& x) const;
```

kann man feststellen, ob ein Wert im Container enthalten ist oder nicht. Falls er gefunden wird, gibt *find* die Position dieses Elements zurück und andernfalls den Iterator *end()*. Da ein assoziativer Container seine Daten sortiert nach den Schlüsselwerten verwaltet, verwendet die *find* die Technik des binären Suchens und hat eine logarithmische Komplexität. Sie ist deshalb deutlich schneller als die globale Funktion *find*, die linear nach einem Element sucht.

Beispiel: Mit Mengen, die Strings enthalten, sind diese Operationen möglich:

```
std::set<std::string> s = { "Daniel", "Alex", "Kathy" };
if (s.find("Alex") != s.end())
    cout << "gefunden" << endl;
else cout << "nicht gefunden" << endl;
```

Bei einem *set* oder *multiset* kann man im Wesentlichen nur feststellen, ob ein Wert enthalten ist oder nicht. Da diese Prüfung mit *find* relativ schnell ist, bieten sich diese Container an, wenn es lediglich um solche Prüfungen geht. Einige Beispiele für die Anwendung dieser Container:

- Eine Rechtschreibprüfung, bei der die Wörter aus einem Wörterbuch in einem *set* abgelegt werden. Bei dem zu überprüfenden Text wird dann für jedes Wort geprüft, ob es im Wörterbuch enthalten ist.
- Da ein *set* einen bestimmten Wert höchstens einmal aufnimmt, kann man mit einem *set* leicht einen Container mit eindeutigen Elementen erzeugen.

Da die binäre Suche nur wenige ( $\log_2(n)$ ) Schritte benötigt, kann man mit einem sortierten *vector* und mit *binary\_search* ein gesuchtes Element ähnlich schnell wie in einem *set* oder *multiset* finden.

### 11.3.2 Die Container *map* und *multimap*

Die assoziativen Containerklassen *map* und *multimap* stehen nach

```
#include <map> // oder import std.core; (siehe Abschnitt 2.13)
```

im Namensbereich *std* zur Verfügung. Container dieser Klassen verwalten Wertepaare, die aus einem Schlüsselbegriff und zugeordneten Daten bestehen. Aufgrund ihrer internen Organisation ermöglichen *map* und *multimap* einen schnellen Zugriff auf die Daten, die zu einem Schlüsselbegriff gehören. Mit Schlüsselwerten des Datentyps T1 und zugehörigen Daten des Datentyps T2 werden solche Container folgendermaßen definiert:

```
std::map<T1, T2> m; // Hier sind T1 und T2 beliebige Datentypen
std::multimap<T1, T2> mm;
```

Wie ein *set* kann ein *map* nur ein einziges Paar mit einem bestimmten Schlüsselwert enthalten. Ein *multimap* kann dagegen mehrere Paare mit demselben Schlüsselwert enthalten. Die folgenden Beispiele verwenden sowohl für T1 als auch für T2 den Datentyp *string*. Die Wertepaare sind dann etwa folgendermaßen definiert:

```
struct pair { //T1 und T2: aus map<T1,T2> bzw. multimap
    T1 first;    // Schlüsselbegriff
    T2 second;   // zugehörige Daten
};
```

Wie bei allen anderen Containern kann man auch einem *map* oder *multimap* mit *insert* Elemente hinzufügen. Da die Elemente hier Wertepaare sind, müssen Wertepaare eingefügt werden. Diese können durch den etwas umständlichen Aufruf eines Konstruktors des nach

```
#include <utility> // oder import std.core; (siehe Abschnitt 2.13)
```

verfügbaren Klassen-Templates *pair*

```
m.insert(std::pair<string, string>("Daniel", "13.11.79"));
```

oder durch den etwas einfacheren Aufruf des Funktions-Templates *make\_pair* erzeugt werden:

```
m.insert(make_pair("Daniel", "13.11.79"));
```

Bei einem *map* (aber nicht bei einem *multimap*) ist das mit dem Indexoperator

```
reference operator[] (const key_type& x);
```

einfacher. Die Zuweisungen

```
m["Daniel"] = "13.11.79";
m["Alex"] = "17.10.81";
```

legen die Paare ("Daniel","13.11.79") und ("Alex","17.10.81") in *m* ab. Der Operator `[]` liefert als Funktionswert die Daten zum Schlüsselwert zurück. Deswegen erhält man bei einem *map* mit

```
string result = "Daniel: " + m["Daniel"];
```

den String "Daniel: 13.11.79". Damit kann man ein *map* wie ein Array ansprechen, ohne dass die Indexwerte wie bei einem Array ganzzahlig sein müssen. Bei einem *multimap* ist der Indexoperator nicht definiert.

Allerdings unterscheidet sich der Indexoperator bei einem *map* folgendermaßen von diesem Operator für ein Array: Falls zu dem als Index verwendeten Wert kein Element im Container enthalten ist, wird ein Standardwert eingefügt. Nach der Abfrage

```
string result = "Alex: " + m["Alexx"]; // Schreibfehler
```

hat *m* drei Elemente und nicht wie vor dieser Abfrage zwei. Deswegen sucht man Elemente meist besser mit *find*:

```
iterator find(const key_type& x);
```



Diese Funktion liefert einen Iterator auf ein Wertepaar mit dem gesuchten Schlüsselwert zurück, wenn es gefunden wurde, und andernfalls den Iterator *end*. Die Daten zum Schlüsselwert sind dabei das Element *second* des Wertepaares:

```
map<T1, T2>::iterator pos = m.find("Daniel");
if (pos != m.end())
    result = "Daniel: " + pos->second;
else result = "Daniel: nicht gefunden";
```

Hier kann die erste Zeile auch verkürzt werden durch

```
auto pos = m.find("Daniel");
```

Der Funktionswert der in allen assoziativen Containern verfügbaren Elementfunktionen

```
iterator lower_bound(const key_type& x);
iterator upper_bound(const key_type& x);
```

ist ein Iterator, der auf das erste Element zeigt, dessen Schlüsselwert nicht kleiner (bei *lower\_bound*) bzw. größer (bei *upper\_bound*) ist als das Argument. Bei einem *multimap*, in dem ein oder mehrere Paare mit dem Schlüsselwert *x* enthalten sind, besteht der Bereich (*lower\_bound(x)*, *upper\_bound(x)*) aus allen Elementen mit dem Schlüsselwert *x*. Die Komplexität dieser Funktionen ist wie die von *find* logarithmisch.

### 11.3.3 Iteratoren der assoziativen Container

Auch für die assoziativen Container erhält man mit *begin()* die Position des ersten Elements und mit *end()* die auf das letzte Element folgende. Für einen Iterator *i* erhält man mit *i++* die Position des nächsten Elements und mit *\*i* seinen Wert. Da die Elemente eines assoziativen Containers Paare (siehe Seite 621) sind, erhält man den Schlüsselwert zu einem Iterator *i* mit *i->first* und den zugehörigen Datenwert mit *i->second*.

Da die Elemente nach den Schlüsselwerten sortiert verwaltet werden, ist das nächste Element immer das mit dem nächsten Schlüsselwert. Deshalb erhält man mit der folgenden *for*-Schleife immer eine nach dem Schlüsselbegriff sortierte Ausgabe der Elemente des Containers:

```
map<string, int> m;
for (auto i = m.begin(); i != m.end(); i++)
    cout << i->first << endl;
```

Ein *multimap* kann mehrere Paare mit demselben Schlüsselwert enthalten. Mit den Elementfunktionen *lower\_bound* und *upper\_bound* erhält man Iteratoren, die den Bereich von Paaren im *multimap* darstellen, die alle als Schlüsselwert den als Argument übergebenen Wert haben. Wenn man zu allen verschiedenen Schlüsselwerten in einem *multimap* die jeweiligen Daten ausgeben will, erreicht man dann wie in dieser Schleife:

```
multimap<string, int> mm;
for (auto i = mm.begin(); i != mm.end(); )
{ // i->first ist der Schlüsselwert
```

```

auto first = mm.lower_bound(i->first);
auto j, last = mm.upper_bound(i->first);
for (j = first; j != last; j++)
{ //j->second ist ein Datenwert zum Schlüsselwert
  i++; // Mit jedem gefundenen Wert hochzählen
};
}

```

Hier muss man insbesondere beachten, dass man den Iterator für die äußere Schleife nicht in der äußeren Schleife weiterzählt, sondern mit jedem gefundenen Datenwert. Da man mit `i++` immer die Position des nächsten Elements erhält, wird sonst die innere Schleife so oft wiederholt, wie Daten zum jeweiligen Schlüsselwert vorhanden sind.

Iteratoren eines assoziativen Containers werden beim Einfügen nie ungültig (siehe Seite 599). Beim Löschen wird nur ein Iterator auf das gelöschte Element ungültig. Das ergibt sich daraus, dass diese Container intern mit Binärbäumen implementiert sind, in die neue Knoten eingehängt und gelöschte ausgehängt (siehe Abschnitt 6.9) werden. Die Position anderer Elemente des Containers wird dadurch nicht verändert.

### Aufgaben 11.3.3

1. Ein **Informationssystem** soll zu einem eindeutigen Schlüsselbegriff eine zugehörige Information finden, z.B. zu einer Artikelnummer den zugehörigen Preis.

Schreiben Sie als **einfachen Prototyp** für ein solches System eine Funktion

```
bool ValueToKey(KeyType key, ValueType& value)
```

deren Rückgabewert *true* ist, wenn zum Argument für *key* ein passender Wert gefunden wurde. Der gefundene Wert soll dann als Argument für *value* zurückgegeben werden. Falls kein passender Wert gefunden wird, soll der Rückgabewert *false* sein. Verwenden Sie dazu einen geeigneten Container.

Testen Sie diese Funktion. Damit man leicht sieht, ob der gesuchte Begriff auch tatsächlich gefunden wurde, sollen der Schlüsselbegriff und die Daten identisch sein. Am einfachsten wählt man 1000 bzw. 100 000 **aufeinander folgende** Werte des Datentyps *int*. Um welchen Faktor dauert die Suche in einem Container mit 1000 000 Elementen etwa länger als die in einem Container mit 1000 Elementen?

2. Beim wiederholten Aufruf eines Zufallszahlengenerators wie *rand* oder *random* kann es vorkommen, dass sich die erzeugten Zufallszahlen wiederholen. Für manche Anwendungen braucht man allerdings **Zufallszahlen, die sich nicht wiederholen**.

Schreiben Sie eine Funktion *NewRand*, die bei jedem Aufruf eine neue Zufallszahl liefert. Die bisher erzeugten Zufallszahlen sollen in einem geeigneten Container abgelegt werden.

3. Schreiben Sie eine **Rechtschreibprüfung**. Dabei soll zuerst ein Wörterbuch aus einer Textdatei erstellt werden, indem diese Datei zeilenweise eingelesen und alle Wörter

daraus mit einer Funktion wie *tokenize* (siehe Aufgabe 4.2.3, 3.) bestimmt werden. Diese Wörter sollen dann in einem geeigneten Container abgelegt werden.

Anschließend soll die zu prüfende Datei als Textdatei zeilenweise eingelesen werden. Auch hier sollen die einzelnen Wörter mit einer Funktion wie *tokenize* bestimmt werden. Für jedes Wort soll dann geprüft werden, ob es in dem Container mit den Wörtern aus dem Wörterbuch enthalten ist.

Testen Sie diese Funktion und insbesondere auch ihr Zeitverhalten, indem Sie aus einer relativ großen Textdatei eine Kopie erstellen und in dieser Datei dann einzelne Wörter verändern. Verwenden Sie die ursprüngliche Datei als Wörterbuch.

4. Mit dem assoziativen Container *multimap* kann man leicht eine **Konkordanzliste** aus einem Text erstellen. Eine solche Liste ist ein alphabetisch geordnetes Verzeichnis aller Wörter aus einem Text, die zu jedem Wort die Nummer einer jeden Seite bzw. Zeile enthält, in der es vorkommt. Wenn man z.B. jedes Wort aus dem folgenden Text zusammen mit seiner Zeilennummer als Paar in einen solchen Container einträgt

```
"Alle meine Entchen"  
"schwimmen auf dem See,"  
"schwimmen auf dem See,"
```

und dann alle diese Worte zusammen mit den zugehörigen Nummern ausgibt, erhält man diese Konkordanzliste:

```
Alle 1  
Entchen 1  
See 2 3  
auf 2 3  
dem 2 3  
meine 1  
schwimmen 2 3
```

Eine Konkordanzliste aus dem Quelltext eines Programms bezeichnet man auch als **Cross-Reference-Liste**. Mit einer solchen Liste kann man feststellen, in welchen Zeilen eines Programms welche Namen (Variablen usw.) verwendet werden.

Schreiben Sie eine Funktion *MakeXRef*, die jeden String aus einem *vector* mit Strings mit der Funktion *tokenize* (siehe Aufgabe 4.2.3, 3.) in Worte zerlegt und jedes solche Wort zusammen mit seiner Zeilennummer in eine geeignete Variable des Typs *multimap* ablegt. Eine Funktion *PrintXRef* soll jedes Wort aus dem mit *MakeXRef* angelegten *multimap* ausgeben sowie zu jedem solchen Wort die zugehörigen Zeilennummern.

Testen Sie diese Funktionen mit den Strings von oben. Eine zweite Variante der Funktion *MakeXRef* soll alle Zeilen einer Textdatei einlesen und zerlegen.

### 11.3.4 Ungeordnete Assoziative Container (Hash-Container)

**Hash-Container** sind assoziative Container, bei denen die Position der Daten zu einem Schlüsselwert aus dem Schlüsselwert berechnet wird. Diese Form der Speicherung wird auch als **gestreute Speicherung** bezeichnet.

Beispiel: Das Prinzip der gestreuten Speicherung soll am Beispiel von Strings als Schlüsselwerten und zugehörigen Daten des Typs *int* illustriert werden. Die Daten kann man dann in einem Array mit *int*-Elementen speichern.

```
const int MaxN = 100;
int HashTable[MaxN];
```

Eine Hash-Funktion berechnet dann zu einem Schlüsselwert die Position im Array:

```
int HashFunction(string s)
{ // eine sehr einfache Hash-Funktion
  int sum = 0;
  for (int i = 0; i < s.length(); ++i) sum += s[i];
  return sum % MaxN;
}
```

Ein Name wird dann an der Position im Array eingetragen, die sich aus dem Wert der Hash-Funktion ergibt:

```
void Insert(string key, int data)
{
  int pos = HashFunction(key);
  HashTable[pos] = data;
}
```

Die Daten zu einem Schlüsselwert findet man dann an der Position, die mit der Hash-Funktion berechnet wird:

```
int GetData(string key)
{
  int pos = HashFunction(key);
  return HashTable[pos];
}
```

Falls die Hash-Funktion für verschiedene Schlüsselwerte denselben Wert hat, spricht man von einer Kollision. Solche Fälle müssen gesondert behandelt werden, z.B. in extra Listen.

Obwohl dieses Beispiel eine starke Vereinfachung ist, zeigt es bereits die wesentlichen Charakteristika der Hash-Container:

- Falls nicht viele Schlüsselwerte dieselbe Position haben, ist der Zeitaufwand für die Suche nach einem Element unabhängig von der Anzahl der Elemente im Container (konstante

Komplexität). Das ist oft schneller als die logarithmische Komplexität bei der Suche in Bäumen.

- Es wird eine Funktion benötigt, die zu einem Schlüsselwert einen *int*-Wert berechnet.
- Damit Kollisionen nicht häufig auftreten, muss normalerweise wesentlich mehr Platz reserviert werden als benötigt wird (Geschwindigkeit wird mit Speicherplatz erkaufte).

Bei einem *unordered\_map* kann man wie bei einem *map* mit dem Index-Operator auf die Daten zu einem Schlüsselwert zugreifen.

Beispiel: Mit einem *map* *m* mit Schlüsselwerten des Typs *string*

```
unordered_map<string, int> AssMapCont;
```

sind z.B. die folgenden Operationen möglich:

```
m["vier"]=4;
int Jahr = m["Daniel"];
```

Hash-Container stehen nach

```
#include <unordered_map> // oder import std.core; (siehe Abschnitt
#include <unordered_set> 2.13)
using namespace std;
```

unter den Namen

*unordered\_set*, *unordered\_map*, *unordered\_multiset*, *unordered\_multimap*

zur Verfügung. In älteren Bibliotheken sind sie auch unter den Namen *hash\_set*, *hash\_multiset*, *hash\_map* und *hash\_multimap* verfügbar. Diese Container haben viele Gemeinsamkeiten mit den sortierten Containern *set*, *map*, *multiset* und *multimap*:

- *set* und *unordered\_set* speichern eindeutige Schlüsselwerte  
*multi\_set* und *unordered\_multi\_set* speichern Schlüsselwerte, die mehrfach vorkommen können.  
*map* und *unordered\_map* speichern Wertepaare mit eindeutigen Schlüsselwerten.  
*multi\_map* und *unordered\_multimap* speichern Wertepaare, bei denen die Schlüsselwerte mehrfach vorkommen können.

Der wesentliche **Unterschied** zwischen den beiden Container-Kategorien besteht darin, dass *set*, *map*, *multiset* und *multimap* intern in einem geordneten Binärbaum gespeichert sind, während die interne Position eines Elements in einem der Hash-Container durch eine Hash-Funktion berechnet wird. Deshalb ist die **Komplexität** für die Suche nach einem Element in der ersten Gruppe **logarithmisch** und in der zweiten Gruppe **konstant**, wenn keine Kollisionen auftreten. Außerdem ist für die Elemente der Hash-Container kein *<-*-Operator notwendig.

Viele Operationen (z.B. *insert*, *find*), Iteratoren und Konstruktoren sind in beiden Container-Kategorien verfügbar und haben auch dieselbe Bedeutung.

Beispiel: Die Anweisungen der Funktion *AssozContainer* können sowohl mit Hash-Containern (*USE\_HASHCONTAINER=1*) als auch mit den assoziativen Containern auf der Basis von Binärbäumen ausgeführt werden (*USE\_HASHCONTAINER=0*) und haben auch jeweils dasselbe Ergebnis:

```
#define USE_HASHCONTAINER 1
#if USE_HASHCONTAINER==1
    #include <unordered_map>
    #include <unordered_set>
    using AssSetCont = std::unordered_set<int>;
    using AssMSetCont = std::unordered_multiset<double>;
    using AssMapCont = std::unordered_map<string, int>;
    using AssMMapCont = std::unordered_multimap<int, string>;
#else
    #include <map>
    #include <set>
    using AssSetCont = std::set<int>;
    using AssMSetCont = std::multiset<double>;
    using AssMapCont = std::map<string, int>;
    using AssMMapCont = std::multimap<int, string>;
#endif

void AssozContainer()
{
    AssSetCont s;
    s.insert(17);
    for (auto i=s.begin(); i!=s.end(); ++i)
        cout<<*i<<endl;

    AssMSetCont ms;
    ms.insert(3.14);
    for (auto i=ms.begin(); i!=ms.end(); ++i)
        cout<<*i<<endl;

    AssMapCont m;
    m.insert(std::make_pair("drei", 3));
    m["vier"]=4;
    for (auto i=m.begin(); i!=m.end(); ++i)
        cout<<i->first<<" ": "<i->second<<endl;

    AssMMapCont mm;
    mm.insert(make_pair(3, string("drei")));
    for (auto i=mm.begin(); i!=mm.end(); ++i)
        cout<<i->first<<" ": "<i->second<<endl;
}
```

Eine Hash-Funktion ist eine Funktion mit einem Parameter des Datentyps der Schlüsselwerte, die einen Wert des Typs *std::size\_t* (*unsigned int*) zurückgibt. Für zwei verschiedene Parameter sollte die Wahrscheinlichkeit gering sein, dass die Hash-Funktion denselben Wert hat.

Die Standardbibliothek stellt **vordefinierte Hash-Funktionen** für die Ganzzahl- oder Gleitkomma-Datentypen, Zeiger und smart-Pointer, Strings (*string*, *wstring*, *u8string* usw., *string\_view* usw.) und einige weitere Datentypen zur Verfügung. Diese werden von den Hash-Containern der Standardbibliothek verwendet. Mit einem Datentyp, für den keine Hash-Funktion definiert ist, kann man keinen Hash-Container definieren.

Beispiel: Mit den Datentypen, für die eine Hash-Funktionen vordefiniert kann man einen Hash-Container definieren:

```
unordered_set<int> u1;    // das geht
unordered_set<double> u2; // das geht
unordered_set<string> u3; // das geht
```

Da für selbstdefinierte Datentypen keine Hash-Funktionen vordefiniert sind, kann mit C kein Hash-Container angelegt werden:

```
class C { };
unordered_set<C> us; // das geht nicht
```

Für selbstdefinierte Datentypen führt man eine Hash-Funktion normalerweise auf die Hash-Funktionen der Elemente zurück. Damit Kollisionen entdeckt werden können, muss für den Datentyp der Gleichheitsoperator definiert sein.

Beispiel: Eine Hash-Funktion für den selbstdefinierten Datentyp

```
struct S {
    std::string Vorname;
    std::string Nachname;
};

bool operator==(const S& lhs, const S& rhs)
{ // notwendig um Kollisionen zu erkennen
    return lhs.Vorname == rhs.Vorname && lhs.Nachname ==
        rhs.Nachname;
}
```

ist z.B. das Funktionsobjekt

```
struct MyHash // eine Funktion geht nicht
{
    // das muss ein Funktionsobjekt sein
    std::size_t operator()(S const& s) const noexcept
    { // https://en.cppreference.com/w/cpp/utility/hash
        std::size_t h1 = std::hash<std::string>{}(s.Vorname);
        std::size_t h2 = std::hash<std::string>{}(s.Nachname);
        return h1 ^ (h2 << 1); // or use boost::hash_combine
    } // ist das eine gute Hash-Funktion? Führen reale Daten
}; // zu vielen Kollisionen?
```

das man bei der Definition angibt:

```
std::unordered_map<S, int, MyHash> m;  
m.insert(std::make_pair(s, 1));  
m[s] = 1;
```

Alternativ kann man den Namensbereich `std` auch um eine Spezialisierung von `std::hash` ergänzen:

```
namespace std  
{  
    template<> struct hash<S>  
    { // eine Spezialisierung von hash für S  
        std::size_t operator()(S const& s) const noexcept  
        { /* wie oben */ }  
    };  
}  
  
std::unordered_map<S, int> m;
```

Dieses Beispiel zeigt, dass die Wahl einer guten Hash-Funktion oft nicht einfach ist. Da eine schlechte Hash-Funktion eine schlechtere Performance als ein geordneter assoziativer Container haben kann, werden Hash-Container oft nur mit den Datentypen verwendet, für die eine Hash-Funktion vordefiniert ist.

Die nächste Tabelle enthält die Laufzeiten für dieselben Operationen mit einem *set* und einem *unordered\_set*. Offensichtlich geht das Einfügen bei einem *set* etwas schneller, und das Suchen in einem *unordered\_set*. Bei größeren Datentypen können die Unterschiede stärker sein.

| Benchmarks VS 2019.5<br>x64 Release /O2 | set      |           | unordered set |           |
|-----------------------------------------|----------|-----------|---------------|-----------|
|                                         | insert   | find      | insert        | find      |
| n=1.000.000 int                         | 0,4 Sek. | 0,14 Sek. | 0,5 Sek.      | 0,07 Sek. |
| n=2.000.000 int                         | 0,8 Sek. | 0,30 Sek. | 1,0 Sek.      | 0,15 Sek. |
| n=3.000.000 int                         | 1,2 Sek. | 0,45 Sek. | 1,5 Sek.      | 0,20 Sek. |
| n=4.000.000 int                         | 1,6 Sek. | 0,61 Sek. | 2,0 Sek.      | 0,28 Sek. |

11.4 Zusammenfassungen von Datentypen

Es kommt immer wieder vor, dass mehrere Werte gemeinsam als Ganzes benötigt werden. Dazu kann man natürlich jedes Mal ein *struct* definieren. Für structs mit zwei Elementen kann man sich solche Definitionen mit dem schon seit C++97 verfügbaren Datentyp *std::pair* ersparen: Ein *pair* stellt zwei Werte dar, die verschiedene Datentypen haben können. C++11 wurde um *std::tuple* erweitert: Ein *tuple* kann nicht nur wie ein *pair* zwei Werte zusammenfassen, sondern beliebig viele. In C++17 wurden außerdem strukturierte Bindungen aufgenommen, mit denen man die Elemente eines *pair* oder *tuple* einfacher ansprechen kann.



In C++17 wurden noch weitere Datentypen aufgenommen, die Werte verschiedener Datentypen annehmen können.

***std::optional***: Dieses Klassen-Template hat einen einzigen Typparameter. Eine Variable des Typs *optional*<T> kann keinen Wert oder einen Wert des als Typargument übergebenen Typs T darstellen.

***std::variant***: Dieses Klassen-Template hat beliebig viele Typparameter. Eine Variable des Typs *variant*<T1, T2, T3, ...> kann dann einen Wert eines der Typargumente darstellen.

***std::any***: Diese Klasse ist kein Template. Eine Variable dieses Datentyps kann einen Wert eines beliebigen Datentyps annehmen.

Alle diese Klassen wurden aus der Boost-Bibliothek übernommen.

### 11.4.1 Wertepaare mit *std::pair*

Die Standardbibliothek verwendet das Klassen-Template *pair* (siehe auch Abschnitt 11.2), um ein Paar von Werten darzustellen:

```
template <class T1, class T2> // vereinfacht, wie in <utility>
struct pair {
    T1 first;
    T2 second;
    constexpr pair() {};
    constexpr pair(const T1& x, const T2& y):first(x), second(y) {};
};
```

Beispiel: Ein *map* oder *multimap* Container enthält Wertepaare mit einem Schlüsselbegriff und zugehörigen Daten. Diese kann man mit der Elementfunktion *insert* einfügen, der man ein *pair* übergibt:

```
std::map<int, std::string> m; // Artikelnummer und Bezeichnung
m.insert(std::pair<int, string>(4567, "Waschmaschine"));
```

Bei einem *std::set*, bei dem das Einfügen gelingen kann oder auch nicht, gibt die Funktion *insert* ein *pair* zurück, dessen zweites Element angibt, ob das Argument tatsächlich eingefügt wurde.

```
std::pair<iterator, bool> insert(const value_type& value);
```

Vor C++11 konnten Werte des Typs *pair* nur mit einem Konstruktor erzeugt werden, bei dem die Datentypen der Typargumente explizit angegeben wurden

```
std::pair<int, std::string> p1 = std::pair<int, std::string>(4567,
                                                             "Waschmaschine");
```

Ab C++11 war das dann mit *auto* oder *make\_pair* etwas einfacher:

```
auto p1a = std::pair<int, std::string>(4567, "Waschmaschine");
auto p2a = std::make_pair(4567, "Waschmaschine");
```

Mit der seit C++17 verfügbaren Ableitung von Template-Typargumenten (siehe Abschnitt 14.2.7) muss man die Typ-Argumente oft nicht mehr angeben:

```
std::pair p3 = std::make_pair(4567, "Waschmaschine");
std::pair p3b = { 4567, "Waschmaschine" };
```

Der Aufruf einer Funktion mit einem *pair*-Parameter (wie z.B. *insert* bei einem *map*) ist im Laufe der Zeit einfacher geworden:

```
std::map<int, std::string> m;
m.insert(std::pair<int, std::string>(4567, "Waschmaschine")); // C++97
m.insert(std::make_pair(4567, "Waschmaschine")); // C++11
m.insert({ 4567, "Waschmaschine" }); // C++17
```

### 11.4.2 Tupel mit *std::tuple*

Die seit C++11 verfügbare Klasse *tuple* ist eine Verallgemeinerung von *pair*: Ein *tuple* ist ein *struct*, das nicht nur zwei, sondern eine beliebige Anzahl von Elementen verschiedener Datentypen enthalten kann. Tupel sind nach

```
#include <tuple> // oder import std.core; (siehe Abschnitt 2.14)
```

im Namensbereich *std* verfügbar. Die Datentypen der Elemente übergibt man als Typargument in spitzen Klammern nach *tuple*. In Abschnitt 14.5.3 wird skizziert, wie *tuple* mit variadischen Klassen-Templates implementiert werden kann.

Beispiel: Die *tuple*-Variable *t1* besteht aus einem Element des Datentyps *int* mit dem Wert 1. *t2* besteht aus einem *double* und einem *int* mit den Werten 1 und 2:

```
tuple<int> t1(1);
tuple<double, int> t2(1, 2);
```

Vor C++17 konnte der Compiler die Datentypen der *tuple*-Elemente noch nicht aus den Datentypen der Konstruktor-Argumente ableiten. Dann hat man die Funktion *make\_tuple* verwendet, mit der man Tupel erzeugen kann, ohne dass man die Datentypen der Elemente angeben muss (analog zu *make\_pair*)

```
tuple<int, double> f2()
{
    return make_tuple(1, 2);
}
```

Die Angabe der Typ-Argumente oder die Funktion *make\_tuple* sind seit C++17 nicht mehr notwendig, da der Compiler die Datentypen der Typ-Argumente aus den Konstruktor-Argumenten ableiten kann.

Beispiel: Die verschiedenen Schreibweisen vor und seit C++17:

```
std::tuple t3 = std::make_tuple(1, std::string("Hallo"));
// vor C++17
std::tuple t4(1, std::string("Hallo")); // seit C++17
std::tuple t5{1, std::string("Hallo")}; // seit C++17
```

Tupel sind bequem, wenn man in einer Funktion mehr als einen Wert zurückgeben will und sich die Definition einer Klasse ersparen will:

```
std::tuple<int, double> f1()
{
    return { 1, 2 };
}
```

Die Elemente eines Tupels kann man mit der globalen Funktion *get* und ihrem Index in spitzen Klammern ansprechen:

```
tuple<int, double> t = f1(); // einfacher: auto t = f1();
int x = get<0>(t); // Index 0 für das erste Element
double y = get<1>(t); // Index 1 für das zweite Element
```

Diese unschöne Schreibweise kann man mit einer strukturierten Bindung (siehe Abschnitt 11.4.3) umgehen.

Das Ergebnis der Vergleichsoperatoren für Tupel ergibt sich aus dem elementweisen Vergleich. Bei den Operatoren *<*, *<=*, *>* und *>=* werden die Elemente lexikografisch verglichen:

```
tuple<int, double> t1 = f2();
tuple<int, double> t2 = t1;
get<0>(t) = 3;
if (t1 == t2) ...
if (t1 != t2) ...
if (t1 < t2) ..
```

### 11.4.3 Strukturierte Bindungen $\Theta$

Durch eine strukturierte Bindung kann man ein *public* Datenelement *x* einer Variablen *v* eines Klassentyps unter einem einfachen Namen ansprechen und so einerseits die Schreibweise *v.x* vereinfachen sowie einen passenderen Namen als *v.x* wählen. Da die Datenelemente einer Klasse aber meist *private* sind, gibt es für strukturierte Bindungen nicht viele Einsatzmöglichkeiten. Zu den wenigen gehören die Klassen *std::pair* und *std::tuple* (siehe Abschnitt 11.4.2).

Die anderen Namen werden dabei nach *auto* und eventuell noch *&* oder *&&* in eckigen Klammern angegeben. Die Anzahl der Namen zwischen den eckigen Klammern muss gleich sein wie die Anzahl der Elemente der Struktur.

Für einen Ausdruck *expression*, dessen Datentyp eine Klasse mit *n* *public* Elementen ist, erhält man eine strukturierte Bindung durch eine der Schreibweisen:

```

auto[a, b, c, ...] = expression;
auto[a, b, c, ...]{ expression };
auto[a, b, c, ...](expression);

```

Dabei werden zwischen den eckigen Klammern nach *auto* n Bezeichner angegeben. Diese Bezeichner sind dann Variablen, die mit den Werten der Elemente des Ausdrucks initialisiert werden. Falls der Datentyp des Ausdrucks *expression* eine Klasse mit zwei Elementen ist, muss man zwischen den eckigen Klammern nach *auto* zwei Bezeichner angeben. Für eine Klasse mit drei Elementen muss man drei Bezeichner angeben, usw.

Da die Namen der Variablen den Elementen der Struktur in der Reihenfolge ihrer Definition zugeordnet werden, muss man bei einer Umordnung der Reihenfolge der Strukturelemente vorsichtig sein.

Beispiel: Diese Beispiele bringen keinen wesentlichen Vorteil und sollen nur die Syntax illustrieren. Mit

```

struct Datum { int Tag, Monat, Jahr; };
Datum d{ 1,2,3 };
auto [t, m, j] = d;

```

kann man die Variable *d.Tag* unter dem Namen *t* ansprechen:

```

if (t == 1); // statt if (d.Tag==1)

```

Für verschachtelte Strukturen

```

struct Person
{
    std::string Name;
    Datum Geburtstag;
};

```

sind zwei getrennte strukturierte Bindungen notwendig:

```

Person p = { "Anton", {1,2,3} };
auto [n, d] = p;
auto [t, m, j] = d;

```

Ein typischer Einsatzbereich für eine strukturierte Bindung sind Werte des Typs *pair* (siehe Abschnitt 11.4.1). Diese Klasse wird in der Standardbibliothek immer wieder verwendet. Dabei sind die Namen der Elemente *first* und *second* oft unpassend. Und bei *std::tuple* ist der Zugriff auf die Elemente mit *get<N>* oft ziemlich sperrig.

Beispiele:

1. Bei einem *std::set* (ein Container, der einen bestimmten Wert nur einmal enthalten kann) gibt die Funktion *insert*

```

std::pair<iterator, bool> insert(const value_type& value);

```

ein *pair* zurück, dessen Element *second* (Datentyp *bool*) angibt, ob das Argument tatsächlich eingefügt wurde.

In C++98 kann man diesen Wert nur direkt abfragen

```
std::set<int> s;
std::pair<std::set<int>::iterator, bool> r =
    s.insert(1); // oder auto r = s.insert(1);
if (r.second)
    cout << "Element wurde eingefügt" << endl;
```

Diese umständliche Schreibweise kann man ab C++17 mit einer strukturierten Bindung vereinfachen, indem man für die Elemente von *pair* aussagekräftige Namen definiert:

```
auto[position, eingefügt] = s.insert(3);
if (eingefügt)
    cout << "Element wurde eingefügt" << endl;
```

Eine strukturierte Bindung ist auch einfacher als das seit C++11 verfügbare *std::tie*. Damit kann man ebenfalls die Elemente einer Struktur an Variablen binden. Da man diese Variablen aber zuvor definieren muss, ist auch das umständlicher als eine strukturierte Bindung:

```
std::set<int>::iterator position;
bool eingefügt{ false };
std::tie(position, eingefügt) = s.insert(2);
if (eingefügt)
    cout << "Element wurde eingefügt" << endl;
```

- Die Elemente eines *map*- oder *multimap*-Containers haben ebenfalls den Datentyp *pair*, wobei hier das Element *first* den Schlüsselbegriff und *second* die zugehörigen Daten darstellt.

In C++98 kann man die Elemente des *map* Containers

```
const std::map<std::string, Datum> Geburtstage{ // Datum wie oben
    { "Daniel", {13,11,1979} },
    { "Alex",    {17,11,1981} }
};
```

nur über die *pair*-Elemente *first* und *second* ansprechen:

```
for (const auto& i : Geburtstage)
    std::cout << i.first << ": " << i.second.Tag << "." <<
        i.second.Monat << "." << i.second.Jahr << std::endl;
```

Mit einer strukturierten Bindung kann man auch aussagekräftigere Namen verwenden:

```

for (auto[Name, Datum] : Geburtstage) // strukturierte Bindung
                                       für map-Elemente
{
    auto[Tag, Monat, Jahr] = Datum; // strukturierte Bindung für
                                     Datum
    std::cout << Name << ": " << Tag << "." << Monat << "." << Jahr
               << std::endl;
}

```

Ein weiterer Einsatzbereich von strukturierten Bindungen sind Daten, von denen man nur einen Teil benötigt, und die wie oft in einer Datenbank andere Namen haben als die, die im Programm angemessen sind.

Beispiel: Gibt man die aus einer Datenbank benötigten Werte in einem *tuple* zurück, spart man sich die Definition einer Klasse:

```

std::tuple<bool, int, std::string, double> getFromDatabase()
{
    R r = get_next_record(); // r soll ein record aus einer
                             // DB sein, der viel mehr als die hier benötigten
                             // Elemente enthält
    return { r.EndOfFile, r.Name, r.Alter, r.Schuhgröße };
}

```

Mit einer strukturierten Bindung kann man die *tuple*-Elemente unter aussagekräftigen Namen ansprechen. wie wenn man eine Klasse mit diesen Namen definiert hätte:

```

while (!EndOfDataBase)
{
    auto [eof, Name, Alter, Schuhgröße] {getFromDatabase()};
    // Jetzt kann man auf die Elemente der Datenbank unter
    } // den Namen "Name", "Alter" und "Schuhgröße" zugreifen

```

Bei einer strukturieren Bindung kann man vor *auto* auch noch *const* angeben, und nach *auto* entweder *&* oder *&&*.

```

const auto[a, b, c, ...] ...
auto&[a, b, c, ...] ...
auto&&[a, b, c, ...] ...

```

Mit *auto&* sind die zwischen [ und ] definierten Variablen Referenzen auf den für *expression* angegebenen Ausdruck, und mit *auto* ohne weitere Angaben Kopien.

Beispiel: Eine mit *auto* ohne *&* definierte strukturierte Bindung definiert keine Referenz auf die Variable, mit der sie initialisiert wird. Ändert man den Wert des Initialisierungsausdrucks, ändert sich der Wert der gebundenen Variablen nicht:

```

auto r = s.insert(3); // s wie oben std::set<int> s,
                        r.second == true
auto[position, eingefügt] = r; // eingefügt == true
r.second = false; // eingefügt == true

```

Definiert man die strukturierte Bindung dagegen mit *auto&*, führt eine Änderung des Werts des Initialisierungsausdrucks auch zu einer Änderung des Werts der gebundenen Variablen:

```

auto r = s.insert(4); // r.second == true
auto&[position, eingefügt] = r; // eingefügt == true
r.second = false; // eingefügt == false

```

Eine strukturierte Bindung kann man nicht nur mit einer Variablen eines Klassentyps, sondern auch mit einem Ausdruck definieren, der

- ein Array ist - das kann ein C-Array oder ein *std::array* sein
- die Elemente *std::tuple\_size<>* und *get<N>* und die Elemente von *std::tuple* enthält.

Beispiel: Mit Arrays:

```

constexpr double a1[2] = { 3.141, 2.718 };
const auto[pi, e] = a1;

std::array<double,2> a2 = { 3.141, 2.718 };
const auto[pi, e] = a2;

```

Mit einer selbstdefinierten Klasse, die nur nicht statische *public* Elemente enthält:

```

struct MeinPaar { std::string Name; int Alter; std::string
                  Wohnort; };

```

ist diese strukturierte Bindung möglich:

```

MeinPaar p;
const auto[Name, Alter, Wohnort] = p;

```

Mit einer Klasse, die die *tuple*-Elemente enthält (das kann auch eine selbst-definierte Klasse sein):

```

std::tuple<int, double, std::string,
           std::vector<std::string>> t;
auto&[Alter, Gewicht, Wohnort, Namen_der_Kinder] = t;

```

#### 11.4.4 *std::optional* – Eine Klasse für einen oder keinen Wert

Viele Funktionen können für bestimmte Argumente keinen Wert zurückgeben. Dann wird oft eine der folgenden Strategien gewählt:

1. Man wählt den Rückgabetyt *bool* und gibt *false* zurück, wenn die Funktion keinen Wert zurückgeben kann. Falls die Funktion aber einen Wert zurückgeben kann, bringt man das

durch den Rückgabewert *true* zum Ausdruck und gibt den Wert in einem Referenzparameter zurück.

Beispiel: Eine Funktion, die einen String, der eine Zahl darstellt, in eine Zahl umwandelt, wird oft nach diesem Schema implementiert:

```
bool try_parse(std::string s, int& result)
{
    try {
        size_t idx;
        result = std::stoi(s, &idx);
        return (idx == s.length()); // Alles wurde
                                    // konvertiert
    }
    catch (...) {
        return false;
    }
}
```

2. Man gibt einen speziellen Wert zurück, der zum Ausdruck bringt, dass die Funktion keinen Wert zurückgeben kann. Das setzt aber voraus, dass die Rückgabotyp Werte hat, die nicht auftreten können, wenn die Funktion einen Wert zurückgeben kann.

Beispiel: Die Elementfunktionen

```
size_type find(const string& str, size_type pos = 0) const noexcept;
```

der Klasse *std::string* geben den Wert *string::npos* zurück, wenn das Argument nicht im String enthalten ist. Der Wert *string::npos* ist der einzige Wert, der bei einer erfolgreichen Suche nach einem Teilstring nicht auftreten kann.

Viele Funktionen der Standardbibliothek sind nach diesem Schema gebaut. Wenn die Parameter einen Bereich durch Iteratoren beschreiben wie in

```
template<class InputIterator, class T>
InputIterator find(InputIterator first, InputIterator last, const T& value);
```

ist der Rückgabewert des Arguments für *last* bei einer erfolgreichen Suche nicht möglich. Das Argument für *last* bringt deshalb als Rückgabewert zum Ausdruck, dass der gesuchte Wert nicht gefunden wurde.

3. Man löst eine Exception aus, wie z.B. in *std::stoi* (siehe unter 1.).
4. Bei der Parameterübergabe hat man oft ein analoges Problem, dass man ein oder auch kein Argument übergeben will. Dann kann man sich mit überladenen Funktionen oder mit Default-Argumenten behelfen.

Alle diese Lösungsansätze lassen sich mit *std::optional* vereinfachen: Eine Variable dieses nach

```
#include <optional>
```



verfügbaren Klassen-Templates

```
template <class T>
class optional {
//die wichtigsten Elementfunktionen werden anschließend vorgestellt
private:
    T * val; // exposition only
};
```

kann einen Wert des Typarguments oder auch keinen Wert darstellen. Damit wird der Umweg über einen speziellen Rückgabetyt vermieden. Ein `std::optional<T>` ist im Wesentlichen ein `std::pair<T,bool>`, das aber für die Anwendung „einen Wert oder keinen Wert darstellen“ optimiert ist.

Eine *optional*-Variable, die keinen Wert enthält, wird durch ein Konstruktor-Argument des Typs `nullopt_t` erzeugt:

```
constexpr optional(nullopt_t) noexcept;
```

Die Angabe dieses Arguments ist aber nicht notwendig, da man mit dem Standardkonstruktor denselben Effekt erhält:

```
constexpr optional() noexcept;
```

Eine Variable des Typs `std::optional` kann man auch mit `std::make_optional` erzeugen.

Eine *optional*-Variable mit einem Wert erhält man mit einem Konstruktor, dem der Wert übergeben wird, oder mit einer Zuweisung. Hier steht U für einen Datentyp, der in das Typ-Argument von *optional* konvertiert werden kann:

```
explicit optional(const optional<U>&);
template <class U>
optional& operator=(const optional&);
optional& operator=(optional&&) noexcept (see below);
template <class U = T> optional& operator=(U&&);
template <class U> optional& operator=(const optional<U>&);
template <class U> optional& operator=(optional<U>&&);
```

Ob eine *optional*-Variable einen oder keinen Wert enthält, kann man mit

```
constexpr bool has_value() const noexcept;
```

feststellen. Diese Prüfung ist aber mit der booleschen Konversionsfunktion

```
constexpr explicit operator bool() const noexcept;
```

auch allein über eine Prüfung der *option*-Variablen möglich. Den Wert erhält man dann mit einer *value*-Funktion:

```
constexpr const T& value() const&;
constexpr T& value() &;
constexpr T&& value() && ;
constexpr const T&& value() const&&;
```

Beispiel: Diese Variante von *try\_parse* (siehe 1.) gibt keinen Wert zurück, wenn das Argument nicht in *int* konvertiert werden kann, bzw. den *int*-Wert, wenn das möglich war:

```
std::optional<int> try_parse(std::string s)
{
    std::optional<int> result; // result enthält keinen Wert
    try {
        size_t idx;
        int i = std::stoi(s, &idx);
        if (idx == s.length()) // Alles wurde konvertiert
            result = std::make_optional(i); // oder result = i;
        // oder result = std::optional(i);
    }
    catch (...) {
    }
    return result;
}
```

Diese Funktion kann folgendermaßen verwendet werden:

```
void test_optional(std::string s)
{
    std::optional<int> t = try_parse(s);
    if (t) // wie if (t.has_value())
        cout << "s ist ein int, i=" << t.value() << endl;
    else
        cout << s << "ist kein int" << endl;

    // oder mit einem init-statement bei if:
    if (auto t = try_parse(s); t.has_value())
    // if (auto t = try_parse(s); t)
        cout << "s ist ein int, i=" << t.value() << endl;
    else
        cout << s << "ist kein int" << endl;

    if (auto t = try_parse(s); t)
        cout << "s ist ein int, i=" << t.value() << endl;
    else
        cout << s << "ist kein int" << endl;
}
```

Rückgabewerte vom Typ *optional* können auch eine Alternative zu Exception-Handling sein.

### 11.4.5 `std::variant` – Eine Klasse für Werte bestimmter Typen

Dem nach

```
#include <variant>
```

verfügbaren Klassen-Template `std::variant`

```
template <class... Types>
class variant { // stark gekürzt - RK
public:
    template <class T, class... Args>
    constexpr explicit variant(in_place_type_t<T>, Args&&...);
};
```

kann man beliebig viele Klassen als Typargument übergeben. Eine Variable dieses Typs stellt dann genau eine Variable einer der als Typargument übergebenen Klassen dar.

Beispiel: Mit den Klassen

```
class Kreis // nicht von einer Basisklasse abgeleitet
{
public:
    Kreis(double r_=0) :r{ r_ } {}
    double Fläche() const { return r*r; }
    void setzeRadius(double r_) { r = r_; }
private:
    double r;
};

class Quadrat // nicht von einer Basisklasse abgeleitet
{
public:
    Quadrat(double a_=0): a{a_} {}
    double Fläche() const { return a*a; }
private:
    double a;
};

class Rechteck // nicht von einer Basisklasse abgeleitet
{
public:
    Rechteck(double a_=0, double b_=0) :a{ a_ }, b{ b_ } {}
    double Fläche() const { return a*b; }
private:
    double a, b;
};
```

kann eine Variable des Typs

```
std::variant<Kreis, Quadrat, Rechteck> f;
```

dann genau eine der als Typargument angegebenen Klassen darstellen:

```
VariantFigur f; // die erste Variante, wie f = Kreis()
f = Kreis(3);   // jetzt ist f ein Kreis
f = Quadrat(4); // jetzt ist f ein Quadrat
f = Rechteck(5); // jetzt ist f ein Rechteck
```

Ein `std::variant<T1,T2,T3>` sieht auf den ersten Blick ähnlich aus wie ein `std::tuple<T1,T2,T3>`. Der wesentliche Unterschied ist aber, dass ein *variant* nur genau ein Typ-Argument enthält, während ein *tuple* alle enthält.

Auf die Elemente eines `std::variant`-Objekts kann man mit `std::visit` zugreifen. `std::visit` kann man als erstes Argument ein Funktionsobjekt übergeben, in dem der Aufrufoperator für alle Elemente des aktuellen `std::variant` überladen ist. `std::visit` ruft dann dieses Funktionsobjekt (d.h. den Aufrufoperator) für das zweite Argument auf.

Beispiel: Für

```
std::variant<Kreis, Quadrat, Rechteck> f;
```

kann das ein Funktionsobjekt wie

```
struct Visitor
{
    void operator()(Kreis x) { cout << x.Fläche() << endl; }
    void operator()(Quadrat x) { cout << x.Fläche() << endl; }
    void operator()(Rechteck x) { cout << x.Fläche() << endl; }
}

Visitor visitor;
```

sein, das dann so aufgerufen werden kann:

```
std::visit(visitor, f);
```

Wenn wie im Funktionsobjekt *visitor* für jede Variante dieselbe Anweisung ausgeführt werden soll, muss man das Funktionsobjekt aber nicht selbst schreiben. Es reicht, diese Anweisung als Lambda-Ausdruck zu übergeben. Mit diesem Lambda-Ausdruck wird dann ein Visitor erzeugt, der für jede Variante einen Aufrufoperator hat, dessen Anweisungsteil der des Lambda-Ausdrucks ist.

Beispiel: Mit

```
std::visit([](const auto& x) { cout << x.Fläche() << endl;
}, f);
```

erhält man mit einer Variante *f* denselben Effekt wie im letzten Beispiel

```
std::visit(visitor, f);
```

Nach der Zuweisung einer Variante an `f` wird die Funktion *Fläche* dieser Variante aufgerufen:

```
std::variant<Kreis, Quadrat, Rechteck> f; // f = Kreis();
std::visit([&](auto const& e) {cout << e.Fläche() << endl;
                                     }, f); // 0

f = Quadrat(4);
std::visit([&](auto const& e) {cout << e.Fläche() << endl;
                                     }, f); // 16

f = Rechteck(5,6);
std::visit([&](auto const& e) {cout << e.Fläche() << endl;
                                     }, f); // 30
```

Ruft man im Lambda-Ausdruck eine Funktion auf, die nicht in allen Varianten existiert, erzeugt der Compiler eine Fehlermeldung:

```
std::visit([&](auto const& x) {cout << x.Fleche();}, f);//
Fehler
```

In diesem Beispiel werden einer Variablen `f` Objekte verschiedener Datentypen zugewiesen. Der Aufruf der Funktion *Fläche* über diese Variable führt dann zur Laufzeit zum Aufruf der Funktion *Fläche* des jeweiligen Objekts. Das ist derselbe Effekt, wenn man einem Zeiger auf ein Objekt einer Basisklasse ein Objekt einer abgeleiteten Klasse zuweist und dann eine virtuelle Funktion aufruft (**Polymorphie** mit virtuellen Funktionen, siehe Abschnitt 8.4.3).

Polymorphie mit `std::variant` und `std::visit` kann deshalb eine **Alternative zu Polymorphie mit virtuellen Funktionen** sein. Allerdings haben beide Alternativen Vor- und Nachteile:

Virtuelle Methoden benötigen im Unterschied zu `std::variant` eine Klassenhierarchie. Mit `std::variant` können dagegen auch Klassen verwendet werden, die unabhängig voneinander definiert und nicht in einer Klassenhierarchie enthalten sind.

Klassen mit virtuellen Funktionen können auch noch später erweitert werden. Es reicht aus, eine Klasse abzuleiten und ihre virtuellen Funktionen zu überschreiben. Bei `std::variant` müsse die Klassen bei der Kompilation bekannt sein.

Virtuelle Methoden in einer Klassenhierarchie benötigen dieselbe Signatur. Bei `std::variant` besteht diese Voraussetzung nicht. Die in einem Visitor (wie z.B. oben) aufgerufenen Funktion können eine beliebige Signatur haben. Die Argumente kann man im Konstruktor des Visitors übergeben und Datenelementen zuweisen.

Virtuelle Methoden werden oft über Zeiger auf dynamischen Speicher aufgerufen. Mit `std::variant` ist Polymorphie auch mit Objekten möglich, die keinen dynamischen Speicher verwenden. Das ermöglicht ihren Einsatz auch bei Anwendungen, in denen kein dynamischer Speicher verwendet werden kann.

Da ein `std::variant` so viel Platz belegt wie die größte Variante, kann das mit einem erhöhten Speicherverbrauch verbunden sein.

Für jede Operation ist ein eigener Visitor notwendig. Das kann bei vielen Operationen etwas aufwendig werden.

### 11.4.6 *std::any*: Ein Datentyp für Werte beliebiger Typen $\Theta$

*std::any* ist eine typsichere Alternative zu *void\**. Eine Variable des nach

```
#include <any>
```

verfügbaren Klassentyps *any*

```
class any
{ // nur ein Auszug
public:
    any(const any& other);
    template <class T> any(T&& value);
    template <class T, class... Args>
    explicit any(in_place_type_t<T>, Args&&...);

    template <class T, class U, class... Args>
    explicit any(in_place_type_t<T>, initializer_list<U>, Args&&...);
    any& operator=(const any& rhs);
    bool has_value() const noexcept;
    const type_info& type() const noexcept;
};
```

kann Werte eines beliebigen Datentyps annehmen.

Beispiel: Der Variablen *a* wird ein Wert des Typs *double*, *string* und *C* zugewiesen:

```
std::any a = 1;
a = 3.14; // ein double-Wert
a = std::string{ "ein String" }; // ein Klassen-Typ
C c; // eine Variable eines selbstdefinierten Klassen-Typs
a = c;
```

Im Konstruktor

```
explicit any(in_place_type_t<T>, initializer_list<U>, Args&&...);
```

hat *in\_place\_type\_t*

```
template <class T>
struct in_place_type_t {
    explicit in_place_type_t() = default;
};
```

im Wesentlichen nur die Aufgabe, den Datentyp eindeutig zu machen.

Eine Variable des Typs *any* kann man auch mit *std::make\_any* erzeugen.

Beispiel: Mit der Variablen *c* aus dem letzten Beispiel kann man *a* den Wert *c* auch so zuweisen:

```
a = std::make_any<C>(c);
```

Den Wert des enthaltenen Datentyps kann man mit einem *any\_cast* bekommen. Dabei muss man den Datentyp des enthaltenen Werts kennen:

```
c = std::any_cast<C>(a);
```

Gibt man dabei einen falschen Datentyp an, wird eine Exception des Typs *bad\_any\_cast* ausgelöst:

```
try {
    int i = std::any_cast<int>(a);
}
catch (std::bad_any_cast& e)
{
    cout << e.what() << endl; // Bad any_cast
}
```

Ob ein *any*-Objekt einen Wert enthält, kann man mit der Elementfunktion *has\_value* prüfen:

```
if (!a.has_value())
{
    const std::type_info &ti = a.type();
    cout << ti.name() << endl;
}
```

Hier wird mit *a.type()* auch der Datentyp des enthaltenen Werts abgefragt. Diesen Datentyp erhält man aber nur als Laufzeit-Wert des Datentyps *type\_info*, den man nicht als C++-Datentyp verwenden kann.

```
std::map<std::string, std::any> m;
m["integer"] = 17;
m["string"] = std::string("Ein String");
m["double"] = 3.14;
for (auto &[key, val] : m)
{
    if (val.type() == typeid(int))
        std::cout << "int: " << std::any_cast<int>(val) << endl;
    else if (val.type() == typeid(std::string))
        std::cout << "string: " << std::any_cast<std::string>(val) <<
            endl;
    else if (val.type() == typeid(double))
        std::cout << "double: " << std::any_cast<double>(val) << endl;
}
```

## 12 Dateibearbeitung mit den Stream-Klassen

Daten in einem Programm wurden bisher vor allem in Variablen dargestellt. Diese Variablen stellen Speicherbereiche im Hauptspeicher des Rechners dar, deren Reservierung am Ende des Programms wieder aufgehoben wird. Deshalb kann man danach nicht mehr auf die Daten zugreifen. Will man Daten über die Laufzeit eines Programms hinaus erhalten, müssen sie auf sogenannten **externen Datenträgern** gespeichert werden. Das sind meist Magnetplatten (Festplatten), Magnetbänder, Speicherchips, optische Speichermedien (CD-ROMs, DVDs usw.) oder einfach Papier, auf dem Daten ausgedruckt werden.

Neben der dauerhaften Speicherung von Daten unterscheiden sich externe Datenträger meist auch durch ihre größere Speicherkapazität vom Hauptspeicher. Allerdings ist der Zugriff auf extern gespeicherte Daten oft langsamer als der auf Daten im Hauptspeicher. So muss bei einer Festplatte der Schreib-/Lesekopf mechanisch positioniert werden.

Das Speichermedium bestimmt auch die Zugriffsmöglichkeiten auf die Daten:

- Über einen Drucker können Daten nur ausgegeben werden.
- Bei Magnetbändern kann man meist nur einen Datensatz nach dem anderen schreiben bzw. in der gespeicherten Reihenfolge lesen. Diese Art der Bearbeitung wird als **sequenziell** bezeichnet und steht für alle Speichermedien zur Verfügung.
- Auf Festplatten kann man auf Daten an einer bestimmten Position direkt zugreifen, ohne dass man alle Daten davor lesen muss. Diese Zugriffsmethode wird als **Direktzugriff** oder **wahlfreier Zugriff** bezeichnet. Sie wird oft verwendet, wenn alle Datensätze dieselbe Länge haben und deshalb die Adresse der Daten auf dem Datenträger berechnet werden kann.

In diesem Abschnitt werden zunächst die Klassen des C++-Standards zur Dateibearbeitung vorgestellt. Abschließend werden dann auch noch kurz die entsprechenden Funktionen der Programmiersprache C gezeigt, da sie auch oft in C++-Programmen verwendet werden.

### 12.1 Stream-Variablen, ihre Verbindung mit Dateien und ihr Zustand

Eine Gesamtheit von Daten, die auf einem externen Datenträger unter einem Namen gespeichert ist, wird als Datei oder File bezeichnet. In einem C++-Programm kann man eine Datei mit einer Variablen der Klassen *fstream*, *ifstream* oder *ofstream* ansprechen. Diese Klassen stehen nach



```
#include <fstream> // oder import std.core; (siehe Abschnitt 2.13)
```

im Namensbereich *std* zur Verfügung und haben die folgenden Konstruktoren:

```
fstream();
fstream(const string& s, ios_base::openmode mode = ios_base::in | ios_base::out);
ifstream();
ifstream(const string& s, openmode mode = in);
ofstream();
ofstream(const string& s, openmode mode = out);
```

Weiteren Konstruktoren haben anstelle eines *string* den Datentyp *const char\**. Das Argument für den Parameter *s* muss ein zulässiger Dateiname sein, der z.B. nach diesem Schema aufgebaut ist:

```
Drive:\DirName\...\DirName\FileName
```

Hier kann man die Angaben für das Laufwerk und den Pfad bei Dateien im aktuellen Verzeichnis auch weglassen. Da das Zeichen „\“ in einem String eine Escape-Sequenz einleitet, muss es doppelt angegeben werden:

```
ofstream f("c:\\test\\test1.dat");
```

Mit einem Raw-String-Literal (siehe Abschnitt 3.3) reicht ein „\“:

```
ofstream f(R"(c:\test\test1.dat)");
```

Durch die Definition einer Stream-Variablen mit einem solchen Konstruktor wird die **Datei** mit dem für den String *s* übergebenen **Dateinamen** geöffnet. Das bedeutet, dass die Stream-Variable anschließend diese Datei darstellt, und dass die Datei mit den Funktionen für die Stream-Klasse bearbeitet werden kann. Eine geöffnete Datei wird beim Betriebssystem registriert, damit verhindert werden kann, dass sie gleichzeitig von einem anderen Programm geöffnet wird.

Die Konstruktoren ohne Parameter definieren eine Stream-Variable, ohne dass eine Datei geöffnet wird. Diese Stream-Variable kann man dann anschließend durch einen Aufruf der Elementfunktion *open* mit einer Datei verbinden. Der Parameter *s* von *open* entspricht dem der Konstruktoren:

```
void open(const char*s, ios_base::openmode mode = ios_base::in |
ios_base::out);
```

Auch bei *open* kann man einen *string* oder ein Raw-String-Literal übergeben.

Hier und bei den entsprechenden Konstruktoren hat der Parameter *mode* ein sogenanntes **Default-Argument**: Setzt man beim Aufruf der Funktion für diesen Parameter kein Argument ein, wird das Default-Argument verwendet. Setzt man aber Werte ein, werden diese anstelle der Default-Werte verwendet. Ein *ifstream* verwendet als Default-Argument im Konstruktor und in der Funktion *open* für *mode* den Wert *ios::in* und ein *ofstream* den Wert *ios::out*.

Das Argument für *mode* legt fest, welche Operationen mit der Datei möglich sind. Zulässig sind die folgenden Werte sowie eine Kombination davon:

- in* öffnet eine Datei zum Lesen. Falls die Datei beim Öffnen nicht existiert oder z.B. kein Zugriffsrecht besteht, hat das einen Fehler zur Folge.
- out* erzeugt eine Datei zum Schreiben. Falls eine Datei mit diesem Namen bereits existiert, wird sie überschrieben.
- app* öffnet eine Datei zum Schreiben. Falls die Datei bereits existiert, wird sie geöffnet, ansonsten wird sie erzeugt. Neue Daten werden immer am Ende der Datei geschrieben.
- trunc* löscht die Daten einer bereits bestehenden Datei beim Öffnen.
- ate* öffnet eine Datei und setzt den Positionszeiger an das Ende der Datei.
- binary* Mit diesem Wert wird die Datei im **Binärmodus** (siehe Abschnitt 12.3) geöffnet, und ohne ihn im **Textmodus** (siehe Abschnitt 12.4).

Diese Werte sind Ganzzahlkonstanten, bei denen immer genau ein Bit gesetzt ist. Mit dem Operator „|“ können verschiedene Modi kombiniert werden.

Beispiel: Mit *ios::out* wird immer eine neue Datei mit dem angegebenen Namen angelegt, unabhängig davon, ob *ios::out* mit *ios::binary* kombiniert wird oder nicht:

```
fstream f1(fn, ios::binary | ios::out); //string fn: Dateiname
```

Kombiniert man bei einem *fstream ios::out* mit *ios::in*, wird eine neue Datei mit dem angegebenen Namen erzeugt, falls noch keine Datei mit diesem Namen existiert. Falls eine solche Datei aber bereits existiert, wird sie geöffnet. Eine Kombination mit *ios::binary* hat darauf keinen Einfluss:

```
fstream f2(fn, ios::binary | ios::out | ios::in);
```

Die folgende Tabelle enthält die zulässigen Kombinationen. Jede dieser Kombinationen kann außerdem mit *binary* und *ate* kombiniert werden. Andere Kombinationen führen zu einem Fehler beim Öffnen der Datei. Alle diese Werte müssen nach „ios::“ angegeben werden.

| <i>in</i> | <i>out</i> | <i>trunc</i> | <i>app</i> | C    |
|-----------|------------|--------------|------------|------|
|           | +          |              |            | "w"  |
|           | +          |              | +          | "a"  |
|           | +          | +            |            | "w"  |
| +         |            |              |            | "r"  |
| +         | +          |              |            | "r+" |
| +         | +          | +            |            | "w+" |

Die letzte Spalte enthält die entsprechenden Modi der Programmiersprache C.

Zwischen den Stream-Klassen bestehen im Wesentlichen die folgenden Unterschiede:

- Die Klasse *ifstream* hat keine Elementfunktionen zum Schreiben und kombiniert das Argument für *mode* immer mit *ios::in*. Deshalb kann man einen *ifstream* verwenden, wenn man eine Datei nur lesen will.

- Entsprechend hat die Klasse *ofstream* keine Funktionen zum Lesen und kombiniert das Argument für *mode* immer mit *ios::out*.
- Ein *fstream* hat dagegen sowohl die Funktionen eines *ifstream* zum Lesen als auch die eines *ofstream* zum Schreiben. Allerdings verwendet ein *fstream* nur das Argument für *mode* und kombiniert es nicht mit den Voreinstellungen. Obwohl ein *fstream* immer die Funktionen zum Lesen bzw. Schreiben enthält, ist ihr Aufruf ein Fehler, wenn beim Öffnen nicht der entsprechende Modus gesetzt wurde.

Diese unterschiedlichen Kombinationen des Arguments für *mode* mit den Voreinstellungen haben die folgenden Konsequenzen:

- Bei einem *fstream* muss man immer alle Modi angeben, wenn man nicht die Voreinstellungen verwenden will. So muss man *ios::out* angeben, wenn man eine Binärdatei zum Schreiben öffnen will:

```
fstream f("c:\\test1.dat", ios::binary | ios::out);
```

Wenn man einen *fstream* nur mit *ios::binary* öffnet, führt das Schreiben in die Datei zu einem Fehler.

- Da bei einem *ifstream* oder einem *ofstream* dagegen der angegebene Modus mit den Voreinstellungen kombiniert wird, kann man nach

```
ofstream f("c:\\test1.dat", ios::binary);
```

in eine Datei schreiben, ohne dass das zu einem Fehler führt.

Die Verbindung zwischen einer Datei und einer Stream-Variablen kann man mit der Elementfunktion

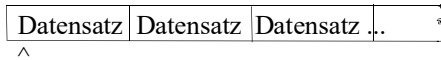
```
void close(); // schließt die Datei
```

wieder trennen. Sie schreibt eventuell noch nicht gespeicherte Daten aus Zwischenpuffern in die Datei und hebt die Reservierung der Datei beim Betriebssystem auf. Deshalb ruft man diese Funktion meist auf, wenn man alle Operationen mit einer Datei beendet hat. Da *close* aber auch immer automatisch beim Verlassen der Verbundanweisung aufgerufen wird, in der die Stream-Variable definiert wurde, muss nicht auf jedes *open* ein *close* folgen. Allerdings ist ein überflüssiger Aufruf von *close* auch kein Fehler.

```
void BearbeiteDatei(string fn)
{
    ifstream f(fn);
    // bearbeite die Datei
    f.close(); // überflüssig, aber nicht falsch
}
```

Die Stream-Klassen stellen die Daten einer Datei als einen **Stream** (Datenstrom) von Zeichen (Bytes) dar. Für die Arbeit mit Dateien ist es oft hilfreich, sich diese Daten als eine Folge von

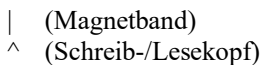
Datensätzen auf einem **Magnetband** vorzustellen. Im einfachsten Fall ist ein solcher Datensatz ein einzelnes Zeichen:



Dieses Modell liegt (vor allem aus historischen Gründen) vielen Operationen mit Dateien zugrunde und gilt auch für Dateien auf Festplatten.

Zu einem Stream gehört insbesondere ein **Positionszeiger**, der immer auf eine bestimmte Position der Datei zeigt. Man kann sich diesen Positionszeiger als einen Schreib-/Lesekopf vorstellen, der immer an einer bestimmten Position über dem Magnetband steht. Wenn ein Datensatz in die Datei geschrieben wird, wird dieser ab der momentanen Position des Schreib-/Lesekopfs auf das Magnetband geschrieben. Der Schreib-/Lesekopf steht anschließend am Anfang des nächsten Datensatzes.

Nach dem Öffnen einer Datei steht der Positionszeiger am Anfang der Datei. Im Modell mit dem Magnetband kann man sich das so vorstellen, dass der zur Datei gehörende Schreib-/Lesekopf am Anfang des Magnetbands steht:



Das Modell mit dem Magnetband zeigt einige wichtige Unterschiede zwischen Arrays und Files:

- In einem **Array** kann man ein bestimmtes Element direkt über seinen Index ansprechen (z.B. `a[i]`).
- In einem **Stream** kann man ein bestimmtes Element nie direkt ansprechen. Stattdessen muss der Positionszeiger („Schreib-/Lesekopf“) an den Anfang des entsprechenden Elements positioniert werden. Anschließend kann das Element gelesen bzw. an dieser Stelle geschrieben werden.
- Im Unterschied zu einem Array muss die Anzahl der Elemente eines Files nicht im Voraus angegeben werden.

## 12.2 Fehler und der Zustand von Stream-Variablen

Eine Stream-Variable enthält zahlreiche Daten. Dazu gehören z.B. ein Puffer für die Daten aus der Datei und der Positionszeiger. Eine Variable für den „**Zustand**“ enthält Informationen darüber, ob die bisherigen Operationen erfolgreich waren. Wenn bei einer Operation mit einer Stream-Variablen ein **Fehler** auftritt, wird in diesem Feld ein Bit für die Kategorie des Fehlers gesetzt.

Diesen Zustand kann man mit der booleschen Elementfunktion **good** abfragen. Ihr Wert ist *true*, falls bisher kein Fehler aufgetreten ist, und sonst *false*.

```
fstream f("c:\\\\test1.dat");
if (!f.good())
    cout << "Fehler beim Öffnen" << endl;
```

Hier wird nach dem Öffnen einer Datei geprüft, ob das möglich war. Da das Argument kein zulässiger Dateiname ist, erhält man eine Fehlermeldung.

Den Funktionswert von *good* kann man auch über den Namen der Stream-Variablen abfragen. Dieser Wert ist ungleich Null (*true*), wenn bisher kein Fehler aufgetreten ist, bzw. Null (*false*), falls ein Fehler aufgetreten ist:

```
fstream f("c:\\\\test1.dat");
if (f) // kein Fehler
{
    // arbeite mit f
}
else cout << "Fehler beim Öffnen" << endl;
```

Nach dem C++-Standard werden im Feld für den Zustand die folgenden Bits bei den jeweils angegebenen Fehlerkategorien gesetzt:

- *eofbit*: Wenn über das Ende einer Datei hinaus gelesen wurde.
- *failbit*: Wenn eine Lese- oder Schreiboperation nicht die gewünschte Anzahl von Zeichen lesen oder schreiben konnte.
- *badbit*: Bei einem schwerwiegenden Fehler, bei dem jede weitere Operation mit der Stream-Variablen keine Aussicht auf Erfolg hat.

Bei den ersten beiden Kategorien kann z.B. eine weitere Leseoperation sinnvoll sein, wenn man die Fehlerbits mit der Elementfunktion

```
void clear();
```

zurücksetzt und den Positionszeiger auf den Anfang der Datei setzt.

Den Zustand der Bits erhält man auch als Funktionswert der Elementfunktionen:

```
bool eof()    // true, falls eofbit gesetzt ist
bool fail()   // true, falls failbit oder badbit gesetzt ist
bool bad()    // true, falls badbit gesetzt ist
```

Wenn in einer Stream-Variablen der Fehlerzustand gesetzt ist, sind **alle weiteren Operationen** mit der Datei **wirkungslos**. Deshalb sollte man vor jeder Operation mit einer Stream-Variablen prüfen, ob die bisherigen Operationen erfolgreich waren.

Mit der Elementfunktion

```
void exceptions(iostate except);
```

kann man erreichen, dass eine Exception ausgelöst wird, wenn bei einer Operation mit einer Stream-Variablen ein Fehler auftritt. Ihr übergibt man als Argument das Bitmuster für die Fehlerkategorien, bei denen eine Exception ausgelöst werden soll:

```
f.exceptions(ios::failbit | ios::badbit | ios::eofbit);
```

## 12.3 Lesen und Schreiben von Binärdaten mit *read* und *write*

Mit dem Parameter *mode* kann man beim Öffnen einer Datei (siehe Seite 649) festlegen, ob sie im Textmodus (indem man `ios::binary` nicht setzt) oder im Binärmodus (indem man `ios::binary` setzt) geöffnet wird.

- Bei einer im **Textmodus** geöffneten Datei werden beim Lesen und Schreiben bestimmte Zeichen in Abhängigkeit vom Betriebssystem, von Landeseinstellungen usw. in andere Zeichen konvertiert. So wird z.B. das Zeichen für einen Zeilenumbruch '\n' unter Windows durch zwei Zeichen '\r\n' dargestellt, während es unter UNIX nicht konvertiert wird. Beim Lesen einer Textdatei wird ein EOF-Zeichen (ctrl-Z, Ascii Nr. 26) als Dateiende interpretiert, auch wenn anschließend noch weitere Zeichen folgen.
- Bei einer im **Binärmodus** geöffneten Datei werden keine solchen Konversionen durchgeführt.

Das ist bereits der einzige Unterschied zwischen dem Text- und Binärmodus. Man kann sowohl Klartext als auch Binärdaten in eine Datei schreiben, unabhängig davon, in welchem Modus sie geöffnet wurde. Wenn man allerdings Binärdaten in eine Datei schreibt, die im voreingestellten **Textmodus** geöffnet wurde, können bestimmte Zeichen konvertiert werden. Wenn man diese Datei später wieder liest, erhält man andere Werte als die geschriebenen. Deswegen werden **Binärdateien** meist im Binärmodus und **Textdateien** im Textmodus geöffnet.

Als Nächstes werden einige Anweisungen vorgestellt, mit denen man Binärdaten in eine Datei schreiben und aus einer Datei lesen kann. Im nächsten Abschnitt werden dann Textdaten betrachtet.

Die Elementfunktion der Stream-Klassen *fstream* und *ofstream*

```
ostream& write(const char* s, streamsize n);
```

schreibt *n* Zeichen des Datentyps *char* ab der Adresse in *s* in die zum Stream gehörende Datei.

Diese Funktion ist aber nicht auf Daten des Datentyps *char* beschränkt. Man kann auch Daten eines anderen Typs schreiben, wenn man ihre Adresse mit einer **Typkonversion** in *char\** konvertiert. Obwohl eine Typkonversionen von *&x* in *char\** mit `static_cast<char*>(&x)` durchgeführt werden sollte, hat sich in diesem Zusammenhang die Schreibweise *(char\*)&x* durchgesetzt.

Der Rückgabewert dieser Funktion ist die aktuelle Stream-Variable. Da eine Stream-Variable den Wert ihrer Elementfunktion *good* darstellt, kann man den Funktionswert zur Prüfung verwenden, ob *write* erfolgreich ausgeführt wurde.

Beispiele:

1. Durch die folgenden Anweisungen wird eine Datei mit dem Namen „20ints.dat“ im Verzeichnis c:\test angelegt. In sie werden 20 Mal *sizeof(int)* Bytes mit der Binärdarstellung der Variablen *i* geschrieben.

```
fstream f("c:\\test\\20ints.dat", ios::binary | ios::out);
if (!f) cout<<"Fehler bei open"<<endl;
for (int i = 0; i<20; i++)
{
    f.write((char*)&i, sizeof(int)); // oder mit static_cast
    if (!f) cout<<"Fehler bei write"<<endl;
}
f.close();
```

Hier wird nach jeder Dateioperation abgefragt, ob sie erfolgreich war. Alternativ kann man auch Exceptions aktivieren und diese Anweisungen im Rahmen einer *try*-Anweisung aufrufen, die diese Exceptions abfängt.

Da in diesem Beispiel nur in die Datei geschrieben wird, kann man anstelle von *fstream* auch die Klasse *ofstream* verwenden. Man spart so die Angabe *ios::out* bei der Definition der Stream-Variablen:

```
ofstream f("c:\\test\\20ints.dat", ios::binary);
```

2. Da der Rückgabewert von *write* die aktuelle Stream-Variable ist und eine Stream-Variable zur Abfrage ihres Zustand (wie *f.good()*) verwendet werden kann, sind die beiden Anweisungen der *for*-Schleife des letzten Beispiels gleichwertig mit dieser einen *if*-Anweisung:

```
for (int i = 0; i<20; i++)
    if (f.write((char*)&i, sizeof(int))); // oder mit static_cast
    else cout << "Fehler bei write" << endl;
```

3. Wenn man nach diesem Schema in eine Binärdatei Werte eines Klassentyps schreibt, der Zeiger enthält, werden nur die Zeiger in die Datei geschrieben, aber nicht die Daten, auf die sie zeigen. Diese sind nach dem Ende des Programms verloren.

```
string s = "das wird nicht in die Datei geschrieben";
ofstream f("c:\\test\\string.dat", ios::binary);
if (f.write((char*)&s, sizeof(string)));
```

Natürlich kann man auch einen String in eine Datei schreiben, z.B. mit

```
f.write((char*)s.c_str(), s.length()); // (char*) hier nicht
                                         notwendig
```

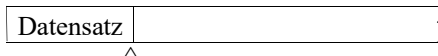
Aber eine solche spezielle Behandlung darf nicht vergessen werden und muss auch beim Lesen der Datei berücksichtigt werden. Bei komplexeren Klassen kann das sehr aufwendig werden.

4. Wenn man Daten aus einem Array in eine Datei schreibt, ist der Adressoperator in *write* nicht notwendig. Durch die folgenden Anweisungen wird eine Datei mit den ersten 5 Elementen des Arrays *a* angelegt:

```
int a[10] = { 0,1,2,3,4,5,6,7,8,9 };
ofstream f("c:\\test\\arr.dat", ios::binary);
f.write((char*)a, 5 * sizeof(int));
```

Da *write* die Daten an den Treiber des Datenträgers übergibt, der die Daten dann parallel auf den Datenträger schreibt, dauert ein *write* mit einem Array etwa genauso lang wie ein *write* mit einem einzelnen Wert (siehe die Benchmarks in Abschnitt 12.4). Mit der Array-Version kann man den Zeitaufwand für das Schreiben größerer Datenmengen in eine Datei deutlich reduzieren.

Nach jedem Aufruf von *write* steht der Positionszeiger am Anfang des nächsten Datensatzes. Falls der Positionszeiger vor dem Schreiben am Ende der Datei steht, wird die Datei erweitert.



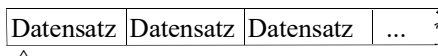
Durch *write* wird ein Datensatz allerdings nur „logisch“ und nicht unbedingt physikalisch in die externe Datei geschrieben: Genau genommen wird der Datensatz nur dem Betriebssystem übergeben und in einen Zwischenpuffer abgelegt. Das Betriebssystem schreibt die Daten erst dann in die externe Datei, wenn der Zwischenpuffer voll ist. Auf die Programmlogik hat diese Zwischenspeicherung keine Auswirkungen. Falls aber ein Programm abstürzt, bevor der Zwischenpuffer in die Datei geschrieben wurde, kann es vorkommen, dass Daten nach dem Aufruf von *write* trotzdem nicht in der externen Datei gespeichert wurden.

Die Elementfunktion *flush* schreibt den gesamten Inhalt des Zwischenpuffers in die Datei:

```
ostream& flush();
```

Ruft man diese Funktion nach jedem *write* auf, ist die Gefahr wesentlich geringer, dass bei einem Programmabsturz Daten verloren gehen. Dadurch wird das Programm allerdings auch etwas langsamer. Falls das akzeptabel ist, wird der Aufruf von *flush* **immer empfohlen**.

Nachdem wir jetzt gesehen haben, wie man Daten in eine Datei schreibt, soll als Nächstes gezeigt werden, wie man eine **Datei lesen** kann. Dazu muss sie zum Lesen geöffnet sein. Wenn der Positionszeiger nicht explizit auf eine andere Position gesetzt wurde, steht er danach am Anfang der Datei:



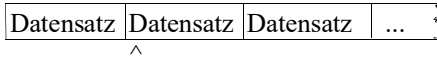
Mit der Elementfunktion der Stream-Klassen *fstream* und *ifstream*

```
istream& read(char* s, streamsize n);
```

kann man *n* Zeichen des Datentyps *char* ab der aktuellen Position des Positionszeigers in den Speicherbereich ab der Adresse in *s* einlesen. Auch diese Funktion ist wie *write* nicht auf



Daten des Datentyps *char* beschränkt. Wenn man Daten eines anderen Datentyps lesen will, konvertiert man die Adresse der Daten mit der **Typkonversion** (*char\**) in den Typs *char\**.



Falls *read* so viele Zeichen lesen konnte, wie im Argument für *n* angegeben wurden, ist beim Aufruf dieser Funktion kein Fehler aufgetreten. Den Erfolg von *read* kann man mit der Funktion *good* prüfen. Da der Funktionswert von *read* wie der von *write* die aktuelle Stream-Variable ist und eine Stream-Variable den Wert von *good* darstellt, kann man auch den Funktionswert von *read* für eine solche Prüfung verwenden.

Da man bei einer Datei zunächst meist nicht weiß, wie viele Datensätze sie enthält, liest man meist so lange Daten aus einer Datei, bis der Zustand der Stream-Variablen einen Fehler anzeigt. Diese Ursache des Fehlers ist dann entweder das Dateiende oder ein anderer Fehler. Mit der Funktion

*bool eof();*

kann man abfragen, ob der Positionszeiger hinter dem letzten Zeichen der Datei steht. Ihr Funktionswert ist genau dann *true*, wenn über das Ende der Datei hinaus gelesen wurde. Im Unterschied zu manchen anderen Programmiersprachen wird das Ende der Datei noch nicht angezeigt, nachdem der letzte Datensatz gelesen wurde.

Die folgenden Beispiele zeigen, wie die in den Beispielen zu *write* angelegten Dateien gelesen werden können:

1. Mit den folgenden Anweisungen kann man eine Datei lesen, bei der immer *sizeof(int)* Bytes als Werte des Datentyps *int* interpretiert werden:

```
int i;
fstream f("c:\\test\\20ints.dat", ios::binary | ios::in);
if (!f) cout << "Fehler bei open" << endl;
f.read((char*)&i, sizeof(int)); // oder mit static_cast
while (f)
{
    cout << i << " " << endl;
    f.read((char*)&i, sizeof(int)); // oder mit static_cast
}
if (!f.eof()) cout << "Fehler bei read" << endl;
else; // f.eof(): kein Fehler
f.close();
```

Anstelle von *fstream* kann man auch *ifstream* verwenden, da die Datei nur gelesen wird. Dann ist das *mode*-Argument *ios::in* überflüssig:

```
ifstream f("c:\\test\\20ints.dat", ios::binary);
```

Hier sieht man ein typisches **Schema für das Lesen von Dateien**, das man oft anwenden kann:

- Vor der Schleife wird ein erster Datensatz gelesen.
- In der Schleife wird zunächst der zuletzt gelesene Datensatz bearbeitet.
- Am Ende der Schleife wird der nächste Datensatz gelesen.

Das Ende einer Datei kann man nur erkennen, indem man über ihr letztes Zeichen hinaus liest. Danach hat die Funktion `good` den Wert `false`, obwohl inhaltlich kein Fehler aufgetreten ist. Wenn man nur auf „echte“ Fehler reagieren will, ist dazu eine Prüfung wie nach der Schleife notwendig.

Nach einem Fehler beim Öffnen einer Datei wird das `failbit` und nicht das `eofbit` gesetzt. Würde man eine Schleife wie oben mit der Bedingung `f.eof()` kontrollieren, hätte das nach einem Fehler beim Öffnen der Datei eine Endlosschleife zur Folge, da `read` nach einem Fehler wirkungslos ist.

```
int i;
ifstream f("c:\\test\\20ints.dat", ios::binary );
if (!f) cout<<"Fehler bei open"<<endl;
f.read((char*)&i, sizeof(int));
while (!f.eof())//Endlosschleife bei Fehler nach open
{
    cout << i << endl;
    f.read((char*)&i, sizeof(int));
}
```

2. Denselben Programmablauf wie im letzten Beispiel erhält man auch, wenn man den Rückgabewert von `read` als Bedingung dafür verwendet, ob `read` erfolgreich ausgeführt werden konnte.

```
int i;
ifstream f("c:\\test\\20ints.dat", ios::binary);
if (!f) cout << "Fehler bei open" << endl;
while (f.read((char*)&i, sizeof(int))) // oder mit static_cast
    cout<<i<<endl;
if (!f.eof())cout<<"Fehler bei read"<<endl;
f.close();
```

3. Eine oben unter 3. mit

```
f.write((char*)s.c_str(), s.length()); // (char*) hier nicht
                                         notwendig
```

angelegte Datei mit Strings kann man nicht lesen, da nicht klar ist, wo ein String aufhört und wo der nächste anfängt. Ein Ausweg wäre, das Ende eines Strings mit dem Nullterminator zu kennzeichnen

```
f.write((char*)s.c_str(), s.length()+1); // (char*) hier nicht
                                         notwendig
```

und dann bis zum nächsten Nullterminator zu lesen. Aber das wird recht aufwendig.

4. Die folgenden Aufrufe von `read` lesen jeweils fünf `int`-Werte in ein Array ein. Diese Vorgehensweise ist aber nur sinnvoll, wenn man weiß, dass die Datei auch fünf solche Werte enthält, bzw. ein Vielfaches davon.

```
int a[10];
ifstream f("c:\\test\\arr.dat", ios::binary);
if (!f) cout<<"Fehler bei open"<<endl;
while (f.read((char*)a, 5 * sizeof(int)))
    for (int i = 0; i<5; i++)
        cout << a[i] << endl;
if (!f.eof()) cout<<"Fehler bei read"<<endl;
f.close();
```

### Aufgaben 12.3

Für diese Aufgaben werden die folgenden Vorbereitungen empfohlen:

- Damit nicht versehentlich Dateien gelöscht werden, soll zunächst ein Testverzeichnis (z.B. „c:\test“) angelegt werden. Alle Dateioperationen sollen nur mit Dateien in diesem Verzeichnis durchgeführt werden.
  - Kopieren Sie einige Text- und Binärdateien (z.B. Header- und exe-Dateien eines Projekts) in das Testverzeichnis und testen Sie damit die folgenden Funktionen.
  - Damit Dateinamen im Windows-Explorer vollständig angezeigt werden, sollte im Windows-Explorer unter *Ansicht|Optionen|Ordnungs- und Suchoptionen|Optionen* die Check-Box *Dateinamenserweiterungen* markiert werden.
1. Rufen Sie die folgenden Funktionen mit Dateien aus dem Testverzeichnis auf. Am einfachsten geben Sie die Dateinamen hart kodiert an.

Überprüfen Sie bei jeder Aufgabe nach jeder Dateioperation, ob sie erfolgreich war. Wenn nicht, soll eine Fehlermeldung ausgegeben werden.

- a) Eine Funktion `countBytes` soll die Größe einer Datei (die Anzahl der Bytes) als Funktionswert zurückgeben, deren Name als Parameter übergeben wird. Dazu soll die Datei im Binärmodus geöffnet werden und ein Zeichen nach dem anderen gelesen werden. Eine weitere Funktion `countBytesTxt` soll sich von `countBytes` nur dadurch unterscheiden, dass die Datei im Textmodus geöffnet wird. Vergleichen Sie die Ergebnisse dieser Funktionen jeweils für Textdateien (z.B. „c:\test\MeinHeader.h“) und Binärdateien (z.B. „c:\test\Project1.exe“) mit der Anzeige im Windows-Explorer. Bei einer weiteren Variante der Funktion `countBytes` soll ein `bool`-Parameter übergeben werden, mit dem gesteuert wird, ob die Datei im Text- oder Binärmodus geöffnet wird.
- b) Eine Funktion `copyFile` soll eine Datei zeichenweise in eine andere kopieren. Die Namen der Dateien sollen als Parameter übergeben werden.
- c) Eine Funktion `compareFiles` soll für zwei als Parameter übergebene Dateien prüfen, ob sie identisch sind.

## 12.4 Lesen und Schreiben mit den Operatoren << und >>

Nachdem wir im letzten Abschnitt gesehen haben, wie man Dateien mit Binärdaten anlegt und liest, werden in diesem Abschnitt Dateien behandelt, die Daten im Klartext enthalten. Solche Dateien kann man mit einem beliebigen Texteditor bearbeiten und nicht nur mit einem speziellen Programm, das den Datentyp der Daten-sätze kennt.

In einen *ofstream* oder *fstream* kann man mit dem **Ausgabeoperator** << Daten der vordefinierten Datentypen als Texte ausgeben. So wird durch die Anweisungen

```
ofstream fs("c:\\test\\20tints.dat", ios::binary);
for (int i = 0; i<20; i++)
    fs << i;
fs.close();
```

eine Datei mit den folgenden 30 Ziffern im Klartext angelegt:

```
012345678910111213141516171819
```

Dabei ist es unerheblich, ob die Datei wie oben im Binärmodus oder im Textmodus geöffnet wurde:

```
ofstream fs("c:\\int-t.dat");//ohne ios::binary Textdatei
```

In beiden Fällen erhält man exakt dieselbe Datei.

Da die Zahlen in dieser Datei ohne Trennzeichen aufeinander folgen, kann man allerdings beim Lesen der Datei nicht mehr feststellen, welche Zahlen in die Datei geschrieben wurden. Bei den im letzten Abschnitt behandelten Binärdateien bestand dieses Problem nicht, da dort alle Datensätze gleich lang sind. Bei solchen Dateien kann man die Daten, die gemeinsam einen Datensatz bilden, leicht als Blöcke derselben Länge identifizieren.

Mit dem Ausgabeoperator << können mehrere Ausdrücke in einer einzigen Anweisung zusammengefasst werden. So wird durch

```
ofstream f("c:\\test\\test2.txt");
f << "int:" << 5 << " float: " << 3.14f << " double: " << 3.14 << endl;
f << "long double: " << 5.1L << " char: " << 'c' << '\n';
f << "string: \n neue Zeile" << endl;
f.close();
```

eine Textdatei mit den folgenden Zeilen angelegt:

```
int:5 float: 3.14 double: 3.14
long double: 5.1 char: c
string:
neue Zeile
```

Hier ist *endl* ein sogenannter **Manipulator**, der die Escape-Sequenz '\n' in die Datei einfügt. Weitere Manipulatoren und Funktionen zur Formatierung von Text werden in Abschnitt 12.6 vorgestellt.

Ein Ausdruck mit dem Ausgabeoperator stellt wie die Funktion *write* die Stream-Variable dar und kann deshalb zur Prüfung verwendet werden, ob die Operation erfolgreich war:

```
if (f << 1 << "xyz" << endl);
else cout << "Fehler" << endl;
```

Die nächste Anweisung schreibt eine Variable des Typs *Kontobewegung* (siehe Abschnitt 5.1) in eine Textdatei. Dabei wird der Name des Inhabers linksbündig (wegen *left* und *setw(20)*) in einem 20 Zeichen breiten Feld ausgegeben. Alle anderen Werte werden rechtsbündig in Felder der jeweils mit *setw* gesetzten Breite geschrieben. Da eine gesetzte Ausrichtung erhalten bleibt, bis sie neu gesetzt wird, reichen dafür zwei Aufrufe. Die mit *setw* gesetzte Feldbreite gilt dagegen nur für die jeweils nächste Ausgabe und muss deswegen jedes Mal gesetzt werden:

```
Kontobewegung k;
f << setw(4) << k.KontoNr << " " << left << setw(20)
  << k.NameInhaber << right << setw(2) << k.Datum.Tag << "."
  << setw(2) << k.Datum.Monat << "." << setw(2)
  << k.Datum.Jahr << " " << k.BewArt << setprecision(8)
  << k.Betrag << endl;
```

Die Manipulatoren *setw* und *setprecision* setzen

```
#include <iomanip>
```

voraus. Offensichtlich sind diese Funktionen mit relativ viel Schreibaufwand verbunden. Deswegen werden zur Formatierung von Strings oft andere Funktionen verwendet wie z.B. die Funktion *sprintf* aus der Programmiersprache C. Die so erzeugten Strings werden dann als Ganzes in die Textdatei geschrieben:

```
char s[100];
sprintf(s, "%4d %-20s %2d.%2d.%2d %c %8.2f\n",
        k.KontoNr, k.NameInhaber, k.Datum.Tag,
        k.Datum.Monat, k.Datum.Jahr, k.BewArt, k.Betrag);
```

Auch wenn die formatierte Ausgabe mit dem **Operator** << etwas umständlich aussieht, hat sie doch gegenüber den *printf*-Funktionen den **Vorteil**, dass sie **typesicher** ist: Wenn man z.B. am Anfang eines größeren Programms eine Variablendeklaration hat und weiter hinten den Wert dieser Variablen mit *sprintf* formatiert, übersieht man bei einer eventuell notwendigen Änderung des Datentyps dieser Variablen leicht, dass man auch die Formatangabe ändern muss. Da der Compiler bei einem solchen Fehler keine Fehlermeldung ausgibt, muss man das gesamte Programm mühsam nach allen Stellen durchsuchen, an denen diese Variable verwendet wird. Bei einer Ausgabe mit << wird das Ausgabeformat dagegen automatisch an den neuen Datentyp angepasst.

Der Operator << funktioniert auch für Dateien, die im Binärmodus geöffnet wurden. Ersetzt man im ersten Beispiel die Zeile zum Öffnen durch

```
fstream f("c:\\test\\t2.txt", ios::out | ios::binary);
```

unterscheidet sich die erzeugte Datei nur durch die Zeichen, die für die Escape-Sequenz '\n' erzeugt werden:

'\n' bei einer Textdatei: Carriage Return + Linefeed (CR/LF)

'\n' bei einer Binärdatei: Linefeed (LF)

Liest man eine so erzeugte Datei in einen Editor ein, wird man oft keinen Unterschied zwischen einer Textdatei und einer Binärdatei feststellen: Viele Editoren interpretieren sowohl die Zeichenfolge CR/LF als auch ein einfaches LF als Zeilenende. Bei der Ausgabe einer Datei auf einem Drucker ist das aber oft anders: Die meisten Drucker können so eingestellt werden, dass sie entweder nur ein LF oder die Zeichen CR/LF als Zeilenende interpretieren. Wenn der Drucker dann die Zeichen CR/LF als Zeilenende erwartet, aber nur LF findet, erfolgt nur ein Zeilenvorschub, ohne dass die nächste Zeile am linken Rand der Seite beginnt.

In Abschnitt 7.3.2 wird gezeigt, wie man den Ausgabeoperator für selbstdefinierte Datentypen so überladen kann, dass sie wie die vordefinierten Datentypen mit diesem Operator ausgegeben werden können.

Aus einem zum Lesen geöffneten Stream kann man mit dem **Eingabeoperator** >> Daten der elementaren Datentypen lesen. Diese Daten müssen im Wesentlichen das Format von Literalen des entsprechenden Datentyps haben. Mit einem überladenen Operator für selbstdefinierte Datentypen kann man auch solche Daten mit diesem Operator einlesen.

Durch die folgenden Anweisungen werden Ganzzahliliterale aus einer Datei gelesen. Diese Werte werden dann der Variablen i zugewiesen. Da der Operator >> führende Whitespace-Zeichen überliest, können so Zahlen gelesen werden, die durch Leerzeichen, Tabulatoren usw. getrennt sind:

```
int i;
ifstream f("c:\\test\\test1-int.txt");
f >> i;
while (f)
{
    cout << i << " " << endl;
    f >> i;
}
if (!f.eof()) cout << "Fehler bei read" << endl;
f.close();
```

Da der Rückgabewert des Eingabeoperators die Stream-Variable ist und diese als Bedingung dafür verwendet werden kann, ob erfolgreich gelesen werden konnte, ist folgende Variante gleichwertig:

```
int i;
ifstream f("c:\\test\\test1-int.txt");
while (f >> i)
    cout << i << " " << endl;
if (!f.eof()) cout << "Fehler bei read" << endl;
f.close();
```

Eine solche Datei kann z.B. mit

```
ofstream f("c:\\test\\test1-int.txt");
for (int i = 0; i<100; i++)
    f << i << " ";
f.close();
```

angelegt werden. Dabei wird nach jeder Zahl ein Leerzeichen als Trennzeichen geschrieben.

Liest man mit dem Eingabeoperator >> ein Zeichen in eine Variable des Datentyps **char** ein, werden zunächst sämtliche **Whitespace-Zeichen** überlesen. Das nächste Zeichen wird dann der Variablen zugewiesen. So wird aus der mit

```
ofstream f("c:\\test\\str.txt");
f << " Ist das nicht schön?" << endl;
```

angelegten Datei durch

```
ifstream f("c:\\test\\str.txt");
char s;
f >> s; // Ergebnis: s='I' und nicht das Leerzeichen!
f.close();
```

der Variablen s das Zeichen 'I' und nicht etwa ein Leerzeichen ' ' zugewiesen. Entsprechend werden auch bei einem String (z.B. in eine Variable des Datentyps **char\***) führende Whitespace-Zeichen überlesen. Außerdem wird das Einlesen eines Strings immer durch das nächste Whitespace-Zeichen beendet. So wird aus der oben angelegten Datei durch

```
ifstream f("c:\\test\\str.txt");
char s[20];
f >> s; // Ergebnis: s="Ist" (ohne führende Leerzeichen!)
f.close();
```

nur der String bis zum ersten Leerzeichen in die Variable s eingelesen.

Die nächste Anweisung liest einen Datensatz des Typs *Kontobewegung* aus einer Textdatei, die wie in den Beispielen oben angelegt wurde:

```
char Punkt1, Punkt2;
std::string Vorname, Nachname;
f >> k.KontoNr >> Nachname >> Vorname >> k.Datum.Tag >> Punkt1
    >> k.Datum.Monat >> Punkt2 >> k.Datum.Jahr >> k.BewArt
    >> k.Betrag;
k.NameInhaber = Vorname + Nachname;
```

Hier wurden die Hilfsvariablen *Punkt1*, *Punkt2*, *Vorname* und *Nachname* verwendet, da der Nachname und der Vorname des Kontoinhabers durch ein Leerzeichen getrennt sind und dieses Leerzeichen das Einlesen eines Strings abschließt. Die als Trennzeichen nach Tag und Monat eingefügten Dezimalpunkte werden in *Punkt1* und *Punkt2* eingelesen und anschließend nicht weiterverwendet. Offensichtlich funktioniert diese Anweisung aber nicht mehr, wenn der Name des Kontoinhabers mehr als ein Leerzeichen enthält. Deshalb sollte man eine Datei nur dann mit dem Operator >> lesen, wenn man ihr Format genau kennt.

Mit den **globalen *getline*-Funktionen** kann man Zeichen aus einer Textdatei in einen *string* der Standardbibliothek einlesen. Diese Funktionen lesen so lange, bis das Ende der Datei erreicht wurde oder das nächste Zeichen den Wert *delim* hat. Mit *delim*='\\n' bzw. der zweiten Version erhält man die einzelnen Zeilen einer Textdatei.

```
istream& getline(istream& is, string & str, charT delim); // #include <string>
istream& getline(istream& is, string& str)
{ return getline( is, str, is.widen('\\n')); }
```

Die Stream-Klassen haben auch **Elementfunktionen** mit dem Namen ***getline***:

```
istream& getline(char_type*s, streamsize n, char_type delim);
istream& getline(char_type*s, streamsize n)
```

Diese unterscheiden sich von den globalen Funktionen dadurch, dass sie ihre Daten nicht in einen String der Standardbibliothek schreiben, sondern in den Speicherbereich ab der Adresse in *s*. Dieser Speicherbereich muss zuvor reserviert worden sein. Da man aber oft nicht weiß, wie lang eine Zeile werden kann, ist die Arbeit mit den globalen Funktionen meist einfacher.

Beispiel: Die Funktion *CopyText* liest die als *ifn* übergebene Datei zeilenweise ein und schreibt die Zeilen in die Datei mit dem Namen *ofn*:

```
void CopyText(string ifn, string ofn)
{
    ifstream fin(ifn);
    if (fin)
    {
        ofstream fout(ofn);
        string z;
        while (getline(fin, z))
            fout << z << endl;
        if (!fin.eof())
            cout << "read-Fehler" << endl;
        fout.close(); // überflüssig
    }
    fin.close(); // überflüssig
}
```

Wie die bisherigen Ausführungen gezeigt haben, kann man Daten sowohl im **Klartext** als auch in **Binärformat** speichern. Welche der beiden Formen man vorzieht, hängt von den Anforderungen im Einzelnen ab:



- Die Speicherung im Klartext hat den **Vorteil**, dass die Daten auch ohne ein spezielles Programm mit einem einfachen Editor gelesen und gegebenenfalls sogar bearbeitet werden können. Da dieses Datenformat auf allen Rechnerplattformen gleich ist, kann man solche Daten auch leicht zwischen verschiedenen Plattformen austauschen (z.B. UNIX, Windows oder zwischen Programmen, die auf demselben Betriebssystem laufen, aber mit verschiedenen Compilern geschrieben wurden).

Allerdings ist es manchmal etwas mühsam, die einzelnen Datenfelder wieder auseinanderzudröseln (z.B. bei Strings).

- Das Lesen von Daten im Binärformat lässt sich dagegen bei den üblicherweise verwendeten festen Blocklängen meist einfacher programmieren. Wenn man die Daten nie zwischen verschiedenen Plattformen austauschen will, kann es vorteilhafter sein, dieses Format zu verwenden. Außerdem werden die Dateien meist kleiner, und oft ist es auch besser, wenn ein Anwender keine einfache Möglichkeit hat, die Daten zu manipulieren. Allerdings kann man mit *read* und *write* meist keine Klassen mit Zeigern in eine Datei schreiben. Das trifft nicht nur für Datenelemente des Typs `char*` zu, sondern auch für String- und Containerklassen, da diese intern Zeiger auf ihre Daten enthalten.

Gelegentlich findet man den Hinweis, dass die Dateioperationen von C++ im Vergleich zu denen von C langsam wären. Das gilt aber nur für das Schreiben von Textdateien, wenn man nicht berücksichtigt, dass *endl* nicht nur ein '\n' in die Datei schreibt, sondern auch den Zwischenpuffer schreibt. Ersetzt man in C++ `<<endl` durch `<<"\n"`, bzw. ergänzt man in C *fprintf* durch ein *fflush*, sind die C++-Operationen im Wesentlichen gleich schnell wie die in C. Das gilt für das Lesen und Schreiben von Text- und Binärdateien. Grundsätzlich ist bei Benchmarks von Dateioperationen aber zu beachten, dass das erstmalige Lesen einer Datei oft viel länger dauert als ein wiederholtes Lesen, bei dem die Dateiinhalte bereits im Betriebssystem-Cache sind.

| Benchmarks VS 2019<br>x64 Release /O2                                         | n=1000      |             | n=1'000'000 |            |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|
|                                                                               | C           | C++         | C           | C++        |
| Textdatei schreiben mit <i>fflush</i> bzw. <i>endl</i>                        | 0,01 Sek.   | 0,01 Sek.   | 6 Sek.      | 6 Sek.     |
| Textdatei schreiben ohne <i>fflush</i> bzw. mit '\n' anstelle von <i>endl</i> | 0,004 Sek.  | 0,004 Sek.  | 1 Sek.      | 4 Sek.     |
| Binäre Datei schreiben                                                        | 0,002 Sek.  | 0,002 Sek.  | 0,05 Sek.   | 0,05 Sek.  |
| Array binär schreiben                                                         | 0,002 Sek.  | 0,002 Sek.  | 0,002 Sek.  | 0,002 Sek. |
| Textdatei lesen                                                               | 0,0002 Sek. | 0,0002 Sek. | 0,2 Sek.    | 0,2 Sek.   |
| Binärdatei lesen                                                              | 0,0002 Sek. | 0,0002 Sek. | 0,03 Sek.   | 0,03 Sek.  |

In dieser Tabelle man sieht vor allem

- den Laufzeitunterschied von *endl* und '\n'
- dass es keinen Unterschied macht, ob man einen großen oder einen kleinen Datenblock schreibt, da eine Schreiboperation nur die Daten an den Treiber übergibt. Der Controller schreibt die Daten dann parallel auf den Datenträger.

## Aufgabe 12.4

### 1. Schreiben Sie eine Funktion

*void CsvTabelleAnlegen(string path);*

die eine Textdatei im csv-Format anlegt. Hier steht „csv“ für „comma separated values“. Das ist ein einfaches, aber trotzdem recht verbreitetes Textformat für Tabellen, bei dem die Zeilen der Tabelle Textzeilen sind (oft im ASCII-Format), und die Spaltenwerte in einer Zeile durch ein spezielles Zeichen (ein Komma oder oft auch ein Semikolon) getrennt sind. Die Spalten der ersten Zeile der Datei werden als Spaltenüberschriften interpretiert.

Die erste Zeile der Datei soll "n;n\*n;n\*n\*n" sein (die Spaltenüberschriften). 5 weitere Zeilen mit 3 Spalten sollen für die Zahlen 5 bis 10 die Zahl, ihr Quadrat und die dritte Potenz anzeigen. Wenn man diese Tabelle in Excel einliest, soll das dann etwa so aussehen:

|   | A  | B   | C     | D |
|---|----|-----|-------|---|
| 1 | n  | n*n | n*n*n |   |
| 2 | 5  | 25  | 125   |   |
| 3 | 6  | 36  | 216   |   |
| 4 | 7  | 49  | 343   |   |
| 5 | 8  | 64  | 512   |   |
| 6 | 9  | 81  | 729   |   |
| 7 | 10 | 100 | 1000  |   |
| 8 |    |     |       |   |

2. Das HTML-Format ist ein Textformat, das unter anderem für Internetseiten verwendet wird. Damit es auf möglichst vielen verschiedenen Rechner- und Betriebssystemen eingesetzt werden kann, verwendet es nur Zeichen des ASCII-Zeichensatzes. Formatangaben werden auch als Markierungen bezeichnet und bestehen aus einem Paar von spitzen Klammern <>, zwischen denen Schlüsselworte und eventuell noch Parameter stehen.

Ein HTML-Dokument beginnt mit der Markierung <HTML> und endet mit </HTML>. Wie bei diesem Paar von Markierungen werden Bereiche oft durch Markierungen begrenzt, bei denen die Markierung für das Ende des Bereichs mit dem Zeichen „/“ beginnt, und bei der das Schlüsselwort in der Ende-Markierung gleich oder ähnlich ist wie in der Anfangsmarkierung.

Bereiche können verschachtelt werden. So kann ein HTML-Dokument einen durch <HEAD> und </HEAD> begrenzten Bereich mit Angaben enthalten, die das gesamte Dokument betreffen. In einem solchen Bereich kann z.B. zwischen <TITLE> und </TITLE> der Text stehen, der in der Titelseite des Browsers angezeigt wird.

Der im Hauptfenster des Browsers angezeigte Text ist in einem durch <BODY> und </BODY> begrenzten Bereich des HTML-Dokuments enthalten.

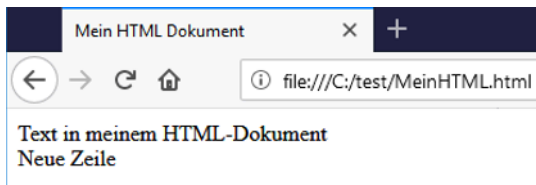
So wird zum Beispiel das HTML-Dokument

```

<HTML>
  <HEAD>
    <TITLE>
      Mein HTML Dokument
    </TITLE>
  </HEAD>
  <BODY>
    Text in meinem
    HTML-Dokument
    <BR>Neue Zeile
  </BODY>
</HTML>

```

in einem HTML-Browser folgendermaßen dargestellt:



Die Einrückungen im HTML-Dokument wirken sich nicht auf die Formatierung aus und wurden hier nur zur besseren Übersichtlichkeit aufgenommen. Zeilenvorschübe im Text werden ebenfalls ignoriert und nur durch die Markierung `<BR>` erzeugt.

Da die Umlaute nicht zum ASCII-Zeichensatz gehören, werden sie durch spezielle Zeichenkombinationen dargestellt:

ä: `&auml;`    ö: `&ouml;`    ü: `&uuml;`    ß: `&szlig;`  
 Ä: `&Auml;`    Ö: `&Ouml;`    Ü: `&Uuml;`

Beispiel: „In Munchen steht ein Hofbrauhaus.“

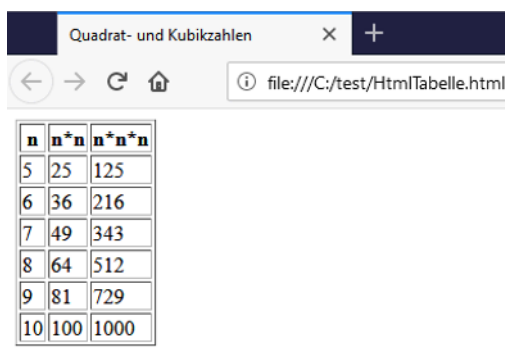
- a) Schreiben Sie eine Funktion *TextToHtml*, die aus einer Textdatei ein HTML-Dokument erzeugt. Dazu sollen die notwendigen Markierungen erzeugt und der gesamte Text der Textdatei in einen durch `<BODY>` und `</BODY>` begrenzten Bereich kopiert werden. Die Titelzeile des Browsers soll den Dateinamen anzeigen. Die einzelnen Zeilen der Textdatei sollen im Browser ebenfalls als einzelne Zeilen dargestellt werden. Die Umlaute sollen durch die entsprechenden Zeichenkombinationen ersetzt werden.
- b) Durch die Markierungen `<TABLE BORDER>` und `</TABLE>` werden Tabellen in einem HTML-Dokument begrenzt. In einem solchen Bereich wird
  - eine Spaltenüberschrift durch `<TH>` eingeleitet
  - eine neue Tabellenzeile durch `<TR>` eingeleitet
  - in einer Tabellenzeile ein neues Datenelement durch `<TD>` eingeleitet.

Alle diese Markierungen brauchen keine Ende-Markierung, da sie durch die nächste Markierung dieser Art begrenzt werden.

Alle diese Markierungen brauchen keine Ende-Markierung, da sie durch die nächste Markierung dieser Art begrenzt werden. Schreiben Sie eine Funktion

```
void HtmlTabelleAnlegen(string path);
```

die eine Tabelle mit den Werten wie in Aufgabe 1 (*CsvTabelleAnlegen*) als HTML-Datei erzeugt. Die so erzeugte Datei wird dann in einem Browser etwa folgendermaßen angezeigt:



The screenshot shows a web browser window titled "Quadrat- und Kubikzahlen". The address bar shows the file path "file:///C:/test/HtmlTabelle.html". The browser displays a table with three columns: "n", "n\*n", and "n\*n\*n". The rows contain values for n from 5 to 10.

| n  | n*n | n*n*n |
|----|-----|-------|
| 5  | 25  | 125   |
| 6  | 36  | 216   |
| 7  | 49  | 343   |
| 8  | 64  | 512   |
| 9  | 81  | 729   |
| 10 | 100 | 1000  |

## 12.5 Dateibearbeitung im Direktzugriff Θ

Wenn man die Daten aus einer Datei mit Funktionen wie *read* oder dem Eingabeoperator liest bzw. mit *write* oder dem Ausgabeoperator schreibt, wird der Positionszeiger mit jeder solchen Operation nach vorne bewegt. Deshalb kann man mit diesen Funktionen die Daten aus einer Datei nur in ihrer Reihenfolge in der Datei bearbeiten. Man spricht dann auch von sequenzieller Dateibearbeitung.

Bei Dateien auf Magnetplatten ist im Unterschied zu Dateien auf Magnetbändern auch ein **Direktzugriff** an einer beliebigen Position in einer Datei möglich. Damit kann der Schreib-/Lesekopf an den Anfang eines bestimmten Datensatzes gesetzt werden, ohne dass sämtliche Elemente davor sequenziell gelesen werden müssen. Diese Zugriffsmöglichkeit wird auch als **wahlfreier Zugriff (random access)** bezeichnet. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass man die Positionen der Datensätze kennt. Bei Binärdateien, bei denen alle Datensätze der Datei gleich groß sind, lässt sich diese Position leicht berechnen. Bei Textdateien mit unterschiedlich langen Datensätzen ist eine solche Berechnung meist nicht möglich.

Der Direktzugriff auf Daten an einer bestimmten Position ist bei einem *fstream* und *ifstream* mit den Funktionen

```
istream& seekg(pos_type offs); // „g“ für get
istream& seekg(off_type offs, ios_base::seekdir mode);
```

und bei einem *ofstream* und *fstream* mit den Funktionen

```
ostream& seekp(pos_type offs); // „p“ für put
ostream& seekp(off_type offs, ios_base::seekdir mode);
```

möglich. Diese Funktionen setzen den zum Stream gehörenden Positionszeiger auf die Position, die *offset* Bytes von der durch *mode* angegebenen Position entfernt ist. Für *mode* sind die folgenden drei Konstanten definiert:

| C++      | C        | Dateiposition                  |
|----------|----------|--------------------------------|
| ios::beg | SEEK_SET | relativ zum Dateianfang        |
| ios::cur | SEEK_CUR | relativ zur aktuellen Position |
| ios::end | SEEK_END | relativ zum Dateende           |

Nach der Ausführung von *seekg* steht der Positionszeiger an der angegebenen Position, und eine darauffolgende *read*-Anweisung liest dann ab dieser Position. Entsprechend überschreibt eine auf *seekp* folgende *write*-Anweisung die Datei ab der Position, die mit *seekp* gesetzt wurde.

Beispiel: Durch die folgenden Anweisungen wird eine Binärdatei mit 10 *int*-Werten angelegt:

```
ofstream f("c:\\test\\direkt.dat", ios::binary);
for (int i = 0; i < 10; i++)
    f.write((char*)&i, sizeof(int));
f.close();
```

In dieser Datei wird dann durch die folgenden Anweisungen die vierte Zahl durch den Wert 100 überschrieben:

```
ofstream f("c:\\test\\direkt.dat", ios::binary);
int i = 100;
f.seekp(3 * sizeof(int));
f.write((char*)&i, sizeof(int));
f.close();
```

Hier muss man insbesondere darauf achten, dass das *n*-te Element einer Datei an der Position *n*–1 beginnt.

Beim Direktzugriff zeigt sich der Unterschied zwischen den beiden Modi *app* und *ate*, die man beim Öffnen einer Datei angeben kann. Bei einer mit *app* geöffneten Datei finden alle Schreiboperationen immer am Ende der Datei statt, unabhängig davon, ob der Positionszeiger mit *seekp* positioniert wurde. Bei einer mit *ate* geöffneten Datei wird der Positionszeiger zunächst auf das Ende der Datei gesetzt. Er kann aber auch auf eine andere Position gesetzt werden.

Wenn der Zustand eines Streams gut ist, erhält man die aktuelle Position des Positionszeigers mit

```
pos_type tellp (); // die Position beim Schreiben
pos_type tellg (); // die Position beim Lesen
```

Diese Funktionen liefern den Funktionswert -1, falls der Zustand des Streams nicht gut ist.

Beispiel: Durch die folgenden Anweisungen erhält man die **Größe einer Datei**, ohne dass man mühsam alle Zeichen lesen und zählen muss:

```
f.seekp(0, ios::end);
int length = f.tellp();
```

Mit dem Direktzugriff ist es insbesondere möglich, einen Datensatz wieder an derselben Position in eine Datei zu schreiben, von der er gelesen wurde. Dazu muss nur der Positionszeiger vor dem Schreiben auf die Anfangsposition zurückgesetzt werden. Diese Position kann vor dem Lesen mit *tellg* bestimmt werden.

## 12.6 Manipulatoren und Funktionen zur Formatierung von Texten Θ

Mit Manipulatoren kann man Angaben zur Formatierung von Ein- und Ausgaben in eine Kette von Ein- und Ausgabeoperatoren >> bzw. << einfügen. Neben den im letzten Abschnitt vorgestellten Manipulatoren *endl* und *setw* stehen im Namensbereich *std* weitere zur Verfügung nach

```
#include <iomanip>
```

Die Manipulatoren *oct*, *dec* und *hex* setzen die **Basis des Zahlensystems** für die Ausgabe von Ganzzahlwerten. Mit der folgenden Anweisung erhält man die als Kommentar angegebene Ausgabe:

```
ofstream f(fn);
f << "dezimal: " << 123 << " hexadezimal: " << hex << 123
  << " oktal: " << oct << 123 << " dezimal: " << dec << 123 << endl;
// dezimal: 123 hexadezimal: 7b oktal: 173 dezimal: 123
```

Der Manipulator *showbase* bewirkt, dass vor einer Ganzzahl im Oktalsystem eine führende Null und im Hexadezimalsystem „0x“ ausgegeben wird. Diese Einstellung kann man mit *noshowbase* wieder zurücksetzen. Ersetzt man in der letzten Anweisung „f“ durch

```
f << showbase
```

erhält man

```
dezimal: 123 hexadezimal: 0x7b oktal: 0173 dezimal: 123
```

Das Ausgabeformat von Werten des Datentyps *bool* kann mit dem Manipulator *boolalpha* auf alphabetisch gesetzt und mit *noboolalpha* wieder zurückgesetzt werden. Durch die Anweisungen

```
f << "true=" << true << " false=" << false << endl;
f << boolalpha << "true=" << true << " false=" << false << endl;
f << noboolalpha << "true=" << true << " false=" << false << endl;
```

erhält man die Zeilen

```
true=1 false=0
true=true false=false
true=1 false=0
```

Die Anzahl der Zeichen, die für die nächste Ausgabe verwendet wird, kann man mit dem Manipulator **setw** setzen. Im Unterschied zu den bisher vorgestellten Manipulatoren gilt diese Angabe aber immer nur für die nächste Ausgabe. Als Füllzeichen wird dabei das mit **setfill** gesetzte Zeichen verwendet. Die Ausrichtung innerhalb des Ausgabebereichs erfolgt mit **left** und **right**. Durch die nächsten beiden Anweisungen erhält man die als Kommentar angegebene Ausgabe:

```
f << setw(5) << 1 << "2" << setfill('$') << setw(5) << "3" << endl;
f << right << setw(5) << 1 << "2" << setfill('.') << left << setw(5)
  << "3" << endl; //      12$$$$3      und      $$$123....
```

Für Gleitkommawerte stehen drei Formate zur Verfügung:

- Das Normalformat ist die Voreinstellung und entspricht der Formatangabe %G in *printf*.
- Das sogenannte wissenschaftliche Format erhält man mit dem Manipulator **scientific**. Es entspricht der Formatangabe %e in *printf* und stellt den Wert mit einer Stelle vor dem Komma und einem Exponenten dar.
- Das Format **fixed** stellt eine Zahl durch die Stellen vor dem Komma, einen Dezimalpunkt und die Nachkommastellen dar. Es entspricht der Formatangabe %f in *printf*.

Diese Formate können mit

```
resetiosflags(ios::fixed)
resetiosflags(ios::scientific)
```

wieder zurückgesetzt werden. Der mit **setprecision** gesetzte Wert bedeutet beim Normalformat die Anzahl der insgesamt verwendeten Stellen. Bei den anderen beiden Formaten bedeutet er die maximale Anzahl der Nachkommastellen. Auf Ganzzahlwerte wirkt sich dieser Wert nicht aus. Die Anweisungen

```
f << "N1:" << setprecision(5) << 123.45678
  << " N2:" << setprecision(10) << 123.45678 << endl;
f << "S1:" << setprecision(5) << scientific << 123.45678
  << " S2:" << setprecision(10) << 123.45678 << endl;
f << "F1:" << setprecision(5) << fixed << 123.45678
  << " F2:" << setprecision(10) << 123.45678 << endl;
```

erzeugen die folgende Ausgabe:

```
N1:123.46 N2:123.45678
S1:1.23457e+02 S2:1.2345678000e+02
F1:123.45678 F2:123.4567800000
```

Mit den Manipulatoren **uppercase** bzw. **nouppercase** wird das „E“ beim Exponenten einer Gleitkommadarstellung sowie das „X“ bei der Hexadezimaldarstellung einer Ganzzahl in

Groß- bzw. Kleinbuchstaben dargestellt. Nach dem Manipulator *showpos* wird auch bei positiven Ganzzahlen ein führendes Pluszeichen angezeigt. Diese Einstellung wird mit *noshowpos* wieder zurückgesetzt.

Der Manipulator *showpoint* bewirkt, dass bei einer Gleitkommazahl immer ein Dezimalpunkt angezeigt wird. Diese Einstellung kann mit *noshowpoint* wieder zurückgesetzt werden. So erhält man mit

```
f << "NS" << setprecision(7) << 123.0 << endl;
f << "S1:" << showpoint << 123.0 << endl << "S2:" << 12.0 << endl;
f << "S3:" << 1.0 << endl;
```

die folgende Ausgabe:

```
NS123
S1:123.00000
S2:12.00000
S3:1.000000
```

Das Überlesen von Whitespace-Zeichen kann mit *noskipws* unterbunden und mit *skipws* wieder auf die Voreinstellung zurückgesetzt werden. Durch

```
char c, c1;
f >> noskipws >> c >> skipws >> c1;
```

wird aus der Datei mit dem Text

```
" Ist das nicht schön?"
```

das erste Leerzeichen in die Variable *c* eingelesen. Das zweite Leerzeichen wird dann überlesen, und *c1* wird das Zeichen 'I' zugewiesen.

## 12.7 Filesystem

Die filesystem-Bibliothek bietet die Möglichkeit, Pfade, Dateien und Verzeichnisse ohne betriebssystem-spezifische Funktionen zu formulieren, abzufragen, zu verändern usw. Das ist meist einfacher als der Aufruf von Systemfunktionen und ermöglicht plattform-übergreifende Programme (für verschiedene Betriebssysteme einheitlich) zu schreiben. Diese Bibliothek steht seit Visual Studio 2012 nach

```
#include <filesystem> //oder import std.filesystem; (siehe Abschnitt
2.13)
```

im Namensbereich

```
std::filesystem
```



zur Verfügung. Sie basiert auf der Boost filesystem-Bibliothek (<http://www.boost.org/>), die im Wesentlichen dieselben Funktionen und Klassen zur Verfügung stellt

Der Namensbereich wird im Folgenden mit *fs* abgekürzt:

```
namespace fs = std::filesystem;
```

Pfade werden über die Klasse *path* angegeben. In Visual Studio können diese direkt in einen String konvertiert werden.

*filesystem* hat zahlreiche globale Funktionen, und *path* zahlreiche Elementfunktionen. Die folgenden Beispiele sollen diese illustrieren.

Beispiel: Beim Aufruf der Funktion

```
void path_infos(std::string ps)
{
    cout << "path_infos" << endl;
    fs::path p{ ps }; // "C:\\Windows\\System"
    cout << "exists(" << ps << "): " << std::boolalpha <<
        fs::exists(p) << endl;
    cout << "p.has_root_name(): " << p.has_root_name() << endl;
    cout << "p.root_path(): " << p.root_path() << endl;
    cout << "p.root_directory(): " << p.root_directory() <<
        endl;
    cout << "p.relative_path(): " << p.relative_path() << endl;
    cout << "p.parent_path(): " << p.parent_path() << endl;
    cout << "p.file_name(): " << p.filename() << endl;
    cout << "p.stem(): " << p.stem() << endl;
    cout << "p.extension(): " << p.extension() << endl;
    cout << "p.has_filename(): " << std::boolalpha <<
        p.has_filename() << endl;
    try {
        unsigned long long s{ file_size(p) }; // Exception bei
        // einem Verzeichnis
        cout << "file_size(p): " << s << endl;
    }
    catch (fs::filesystem_error& e)
    {
        cout << "file_size exception: " << e.what() << "\n";
    }

    std::string parts;
    string s1 = p.root_name().string();
    cout << p.filename() << " Verzeichnis: " << std::boolalpha
        << fs::is_directory(p) << " gewöhnliche Datei: " <<
        fs::is_regular_file(p) << endl;
}
```

mit den Argumenten (ein Verzeichnis und eine Datei)

```
path_infos("C:\\Windows\\System");
path_infos("c:\\Windows\\win.ini");
```

erhält man die Ausgabe

|                                                          |                                    |
|----------------------------------------------------------|------------------------------------|
| path_infos                                               |                                    |
| exists(C:\Windows\System): true                          | exists(c:\Windows\win.ini): true   |
| p.has_root_name(): true                                  | p.has_root_name(): true            |
| p.root_path(): C:\                                       | p.root_path(): c:\                 |
| p.root_directory(): \                                    | p.root_directory(): \              |
| p.relative_path(): Windows\System                        | p.relative_path(): Windows\win.ini |
| p.parent_path(): C:\Windows                              | p.parent_path(): c:\Windows        |
| p.file_name(): System                                    | p.file_name(): win.ini             |
| p.stem(): System                                         | p.stem(): win                      |
| p.extension():                                           | p.extension(): .ini                |
| p.has_filename(): true                                   | p.has_filename(): true             |
| file_size exception: file_size(p): ...: op not permitted | file_size(p): 590                  |
| System Verzeichnis: true                                 | gewöhnliche Datei: false           |
|                                                          | win.ini Verzeichnis: true          |
|                                                          | false gewöhnliche Datei: true      |

Mit *append*, *concat* und dem für *path*-Operanden überladenen Operator */* kann man Pfade zusammenfügen. Dabei wird mit *append* das system-spezifische Trennzeichen eingefügt, und bei *concat* nicht. Dieses Trennzeichen erhält man auch mit *path::preferred\_separator*:

```
auto s = fs::path::preferred_separator; // '\\' unter Windows, '/'
                                         unter Linux
```

Beispiel: Die Schreibweise mit dem */*-Operator ist recht intuitiv. Mit

```
fs::path root{ "C:" };
fs::path dir{ "temp" };
fs::path index{ "index.html" };

fs::path pc;
pc.concat("C:").concat("temp").
    concat("index.html"); // C:temp\index.html

fs::path pp = root;
pp += dir;
pp += index; // C:temp\index.html

fs::path pa;
pa.append(root).append(dir).
    append(index); // C:temp\index.html

fs::path ps = root;
ps /= dir;
ps /= index; // C:temp\index.html

fs::path p = root / dir / index; // C:temp\index.html
```

erhält man jedes Mal denselben Pfad.

Verzeichnisse kann man mit `create_directory` anlegen.

```
Beispiel: fs::path p("C:\\Test\\MeinUnterverzeichnis\\UndNochEins");
           // mehrfache Unterverzeichnisse sind möglich
fs::create_directory(p);
fs::path p1("C:\\Test\\MeinUnterverzeichnis\\UndNochEins");
cout << "Und alle löschen: " << fs::remove_all(p1) << endl;
```

Mit einem `directory_iterator` kann man alle Dateien eines Verzeichnisses durchlaufen. Dabei werden die Verzeichnisse „.“ und „..“ übergangen. Gewöhnliche Dateien erhält man mit der Prüfung `fs::is_regular_file`, und Verzeichnisse mit `fs::is_directory`.

Beispiel: Die Funktion `GetFiles` gibt alle Dateien des als Argument übergebenen Verzeichnisses in einem `vector` zurück:

```
vector<fs::path> GetFiles(const std::string& start)
{
    vector<fs::path> result;
    cout << "GetFiles: " << start << endl;
    fs::path p{ start };
    for (auto it = fs::directory_iterator(p); it !=
           fs::directory_iterator(); ++it)
    {
        try {
            if (fs::is_regular_file(*it))
                result.push_back(*it);
        }
        catch (fs::filesystem_error& e)
        {
            cout << "Exception in GetFiles: " << e.what() << "\n";
        }
    }
    return result;
}
```

Ändert man die Bedingung in `is_directory`, erhält man alle Verzeichnisse. Im nächsten Beispiel wird außerdem eine bereichsbedingte `for`-Schleife anstelle der gewöhnlichen `for`-Schleife im letzten Beispiel verwendet.

Beispiel: Die Funktion `GetDirectories` gibt alle Verzeichnisse des als Argument übergebenen Verzeichnisses in einem `vector` zurück. Im letzten Beispiel muss man nur eine Zeile ändern:

```
vector<fs::path> GetDirectories(const std::string& start)
{
    vector<fs::path> result;
    cout << "GetDirectories: " << start << endl;
    fs::path p{ start };
```

```

for (const auto& it: fs::directory_iterator(p))
{
    try {
        if (fs::is_directory(it.status()))
            result.push_back(it);
    }
    catch (fs::filesystem_error& e)
    {
        cout<<"Exception in GetDirectories: "<<e.what()<<"\n";
    }
}
return result;
}

```

Ein *recursive\_directory\_iterator* durchläuft auch die Unterverzeichnisse. Dazu muss man in den letzten beiden Beispielen nur *directory\_iterator* durch *recursive\_directory\_iterator* ersetzen. Da dabei Iteratoren zurückgegeben werden, kann man diese auch mit *std::copy\_if* kopieren. Das schreibt sich dann etwas einfacher.

Beispiel: Die Dateien in allen Unterverzeichnissen werden in einem *vector* zurückgegeben:

```

vector<fs::path> GetFilesMitCopyRekursiv(const std::string&
start)
{
    vector<fs::path> result;
    cout << "GetFiles:" << start << endl;
    fs::path p{ start };

    fs::recursive_directory_iterator it(p); // einzige Änderung
    std::copy_if(begin(it), end(it), back_inserter(result),
        [](fs::path p) { return fs::is_regular_file(p); });
    return result;
}

```

Hier werden die Verzeichnisse in allen Unterverzeichnissen zurückgegeben:

```

vector<fs::path> GetDirectoriesMitCopyRekursiv(const
                                                std::string& start)
{
    vector<fs::path> result;
    cout << "GetFiles:" << start << endl;
    fs::path p{ start };
    fs::recursive_directory_iterator it(p); // einzige Änderung
    std::copy_if(begin(it), end(it), back_inserter(result),
        [](fs::path p) { return fs::is_directory(p); });
    return result;
}

```

**Aufgabe 12.7**

Schreiben Sie eine Funktion *searchFiles*, die die Namen aller Dateien anzeigt, die zu einer als Parameter übergebenen Maske passen. Dabei sollen ausgehend von einem als Parameter übergebenen Laufwerk bzw. Verzeichnis aller Unterverzeichnisse durchsucht werden. Die Anzahl der gefundenen Dateien soll als Funktionswert zurückgegeben werden.

Zum Testen können Sie die Anzahl der gefundenen Dateien mit der Anzahl vergleichen, die nach einem entsprechenden *dir*-Befehl wie z.B.

```
dir \*.cpp /s
```

ein einer Eingabeaufforderung (*Start|Windows-System|Eingabeaufforderung*) angezeigt wird. Am einfachsten geben Sie den Namen des Verzeichnisses hart kodiert im Quelltext an.

## 13 Funktoren, Funktionsobjekte und Lambda-Ausdrücke

Eine Klasse mit einem Aufrufoperator wird auch als **Funktor** bezeichnet, und ein Objekt einer solchen Klasse als Funktionsobjekt. Funktionsobjekte können wie Funktionen verwendet werden. Sie bieten aber zusätzliche Möglichkeiten und können oft einfacher als gewöhnliche Funktionen verwendet werden. Funktoren und Funktionsobjekte spielen in C++ und der Standardbibliothek eine große Rolle.

### 13.1 Der Aufrufoperator ()

Ein Objekt einer Klasse, für die ein Aufrufoperator definiert ist, kann man wie eine Funktion verwenden. Mit dieser Formulierung ist aber nicht gemeint, dass „das Objekt aufgerufen“ wird. Ein Aufrufoperator ermöglicht lediglich die Verwendung derselben Syntax wie bei einem Funktionsaufruf. Dabei wird dann die für den Aufrufoperator definierte Operatorfunktion aufgerufen.

Für den einen oder anderen Leser mag es auf den ersten Blick etwas seltsam klingen, ein Objekt wie eine Funktion zu verwenden. Wir werden aber bald sehen, dass viele Sprachkonzepte von C++ auf Funktoren beruhen. Einige dieser Konzepte haben wir bereits früher verwendet, ohne die technischen Hintergründe genauer zu beschreiben.

Der Aufrufoperator muss eine nicht statische Elementfunktion sein. Bei seiner Definition steht ein erstes Klammerpaar ohne Parameter für den Aufrufoperator. Im zweiten Klammerpaar wird die Parameterliste angegeben. Ein Objekt einer Klasse, für die der Aufrufoperator definiert ist, bezeichnet man auch als **Funktionsobjekt**.

Beispiel: Die Klasse C hat zwei überladene Aufrufoperatoren mit einem und mit zwei Parametern:

```
class C {  
public:  
    int operator()(int x) {};  
    double operator()(int x, double y) {};  
};
```

Deshalb ist ein Objekt der Klasse C ein Funktionsobjekt, das man mit einem oder zwei Argumenten „aufrufen“ kann:

```

C c;
int x1;
double y1;
int y = c(x1);
double z = c(x1, y1);

```

Die nächsten Beispiele sollen zeigen, welche Vorteile Funktionsobjekte gegenüber Funktionen haben können, und wo diese zum Tragen kommen. Diese Beispiele orientieren sich an dem STL-Algorithmus *for\_each*, sind aber einfacher als dieser und verwenden keine Templates.

Angenommen, Sie benötigen eine Funktion, die für alle Elemente eines Containers eine Operation durchführt. Dann liegt dieser Ansatz nahe:

```

void for_each(std::vector<int> v, std::function<void(int)> f)
{
    for (auto& i : v)
        f(i);
}

```

*for\_each* kann man dann eine Funktion übergeben, die die gewünschte Operation durchführt. Falls alle Elemente ausgedruckt werden sollen, kann man eine Funktion wie *print* übergeben:

```

void print(int v)
{
    cout << v << endl;
}

```

Die Elemente eines Vektors *v* mit *int*-Elementen werden dann durch

```
for_each(v, print);
```

ausgegeben.

Wenn man jetzt in der übergebenen Operation nicht nur die Elemente ausgeben will, sondern auch noch die ausgegebenen Elemente zählen will, ist das mit einer Funktion nicht, bzw. nur unschön (z.B. über eine globale Variable) möglich. Hier ist ein Funktor wie *Print* ein Ausweg:

```

class Print {
    int n;
public:
    Print() :n(0) {}
    void operator()(const int& v)
    {
        cout << v << endl;
        n++;
    }
    int Count() { return n; }
};

```

## Die Funktion

```
Print for_each(std::vector<int> v, Print f)
{
    for (auto& i : v)
        f(i);
    return f;
}
```

kann man mit einem Funktionsobjekt des Typs *Print* aufrufen:

```
Print p = for_each(v, Print()); // Print() ist ein temporäres Objekt
```

Hier wird die lokale Variable *f* in *for\_each* mit dem temporären Objekt initialisiert, das mit dem Standardkonstruktor erzeugt wird und in dem die lokale Variable *n* den Wert 0 hat. Jeder Aufruf von *f* führt dann zum Aufruf des Aufrufoperators von *Print*. Dieser zählt die Variable *n* hoch. Da *f* nach dem Ende der Schleife zurückgegeben wird, kann man mit diesem Rückgabewert *Count* aufrufen und so die Anzahl der ausgegebenen Werte ausgeben:

```
cout << p.Count() << endl;
```

Die Funktion *print* und ein Funktionsobjekt des Typs *Print* zeigen den wesentlichen Unterschied zwischen Funktionen und Funktionsobjekten:

- Da die nicht statischen lokalen Variablen einer Funktion bei jedem Aufruf neu angelegt werden, kann eine Funktion zwischen zwei verschiedenen Aufrufen keine Daten in solchen Variablen speichern. Will man in einer Funktion Variablen verwenden, die zwischen den verschiedenen Aufrufen existieren, müssen das globale oder statische lokale Variablen sein. Deshalb ruft man ein Funktions-Template wie *for\_each* meist nur mit solchen Funktionen auf, die als Daten nur Parameter verwenden.
- Wenn dagegen zwischen verschiedenen Aufrufen Daten erhalten bleiben sollen, verwendet man meist ein Funktionsobjekt. In einem Objekt der Klasse *Print* wird so die Anzahl *n* zwischen verschiedenen Aufrufen gespeichert.
- Beachten Sie bitte den kleinen Unterschied bei der Übergabe von Funktionsobjekten und von Funktionen: Funktionsobjekte werden oft als temporäre Objekte übergeben, die mit ihrem Standardkonstruktor erzeugt werden. Dann muss nach dem Namen der Klasse ein Paar von Klammern angegeben werden.

In den Beispielen oben wird die Funktion *print* ohne Klammern übergeben, während das Funktionsobjekt ein temporäres Objekt *Print()* (mit Klammern) ist. Diese syntaktischen Feinheiten werden leicht übersehen und können dann die Ursache von Fehlermeldungen sein, die nicht immer auf die Ursache des Problems hinweisen.

Funktoren und Funktionsobjekte spielen in C++ und der Standardbibliothek eine große Rolle: *std::function* (siehe Abschnitt 8.2.14), *std::bind* (siehe Abschnitt 13.3), die Random-Klassen (siehe Abschnitt 15.9.3) und zahlreiche weitere Klassen sind Funktoren. Die Algorithmen der STL entfalten ihre Leistungsfähigkeit oft nur mit Funktionsobjekten.

Beispiel: Die nächste Tabelle enthält die Laufzeiten der Anweisungen unter a) bis e) nach den folgenden Definitionen:



```
const int n = 10'000'000;
NumType a[n]; // Type: z.B. int oder double
for (int i = 0; i<n; i++) a[i] = i;
vector<NumType> v(a, a + n);
```

Dabei ist *for\_each* nicht eine der Funktionen von oben, sondern der Algorithmus *for\_each* aus der STL. Dieser kann sowohl mit *print* als auch mit *Print()* aufgerufen werden.

- a) *sum* ist eine Funktion, die die Werte des Arrays in eine globale Variable summiert:

```
for_each(v.begin(), v.end(), sum);
```

- b) Eine *for*-Schleife, bei der bei jeder Wiederholung die Funktion *end* aufgerufen wird:

```
for (auto i = v.begin(); i != v.end(); ++i)
    Summe += (*i);
```

- c) Eine *for*-Schleife wie in b), bei der aber der Aufruf der Funktion *end()* durch die Abfrage einer Variablen ersetzt wird:

```
auto end = v.end();
for (auto i = v.begin(); i != end; ++i)
    Summe += (*i);
```

- d) Eine *for*-Schleife mit einem C-Array:

```
for (int i = 0; i<max; ++i)
    Summe += a[i];
```

- e) Die Werte aus dem *vector* werden mit *std::accumulate* aufsummiert:

```
Summe = std::accumulate(v.begin(), v.end(), 0.0);
```

- f) Eine bereichsbasierte *for*-Schleife:

```
for (const auto& i : v)
    sum = sum + i;
```

| Benchmarks Visual Studio 2019, x64 Release /O2, n= 10'000'000 |    |    |    |    |    |    |
|---------------------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|
| Summe berechnen                                               | a) | b) | c) | d) | e) | f) |
| Zeiten in Millisekunden                                       | 30 | 30 | 30 | 30 | 10 | 30 |

Offensichtlich dauert der Aufruf eines Funktionsobjekts auch nicht länger als der einer gewöhnlichen Funktion. Deshalb sind die Algorithmen der STL, die Funktionsobjekte verwenden, auch nicht langsamer als selbst geschriebene Schleifen.

## 13.2 Prädikate und Vergleichsfunktionen

Funktionsobjekte oder Funktionen, bei denen der Rückgabetyt des Aufrufoperators bzw. der Funktion *bool* ist, werden auch als **Prädikate** bezeichnet. In den STL-Algorithmen haben Template-Parameter für Prädikate oft den Namen *Predicate*:

```
template <class InputIterator, class Predicate>
InputIterator find_if(InputIterator first, InputIterator last,
                    Predicate pred)
{
    while (first != last && !pred(*first)) ++first;
    return first;
}
```

Hier steht *Predicate* für ein Prädikat mit einem Parameter. Für *InputIterator* kann man Iteratoren eines Containers übergeben. Mit einem `vector<string>` kann man es wie die Funktion

```
std::vector<string>::iterator find_if(std::vector<string>::iterator
    first, std::vector<string>::iterator last,
    std::function<bool(string)> pred)
{
    while (first != last && !pred(*first)) ++first;
    return first;
}
```

verwenden. Mit den Argumenten *first* und *last* gibt *find\_if* einen Iterator auf das erste Element im Bereich *[first, last)* zurück, für das das Prädikat *pred* erfüllt ist, bzw. *last*, falls kein Element in diesem Bereich diese Bedingung erfüllt.

Beispiel: Falls man in einem Container mit Strings den ersten String sucht, der mit einer bestimmten Zeichenfolge beginnt, übergibt man *find\_if* z.B. ein Prädikat wie

```
bool StartsWith_123(string s)
{
    bool result = false;
    string start = "123";
    if (s.length() >= start.length())
        result = s.substr(0, start.length()) == start;
    return result;
}
```

Dann hat nach

```
std::vector<string> v = { "ab", "1a23", "12345" };
auto p = std::find_if(v.begin(), v.end(), StartsWith_123);
string result;
if (p != v.end())
    result = *p;
```

*result* den Wert "12345".

Prädikate mit zwei Parametern werden auch als **binäre Prädikate** bezeichnet. Der Template-Parameter hat dann meist den Namen *BinaryPredicate*. In der Standardbibliothek ist das binäre Prädikat *greater* etwa so definiert:

```
template <class T>
struct greater
{
    constexpr bool operator()(const T& x, const T& y) const
    {
        return x > y;
    }
};
```

Damit hat nach

```
greater<int> g;
```

der Ausdruck

```
g(2, 3) // bool
```

denselben Wert wie

```
2 > 3
```

Oft verwendet man als Argument auch ein temporäres Objekt:

```
greater<int>()
```

Diesem kann man die Argumente für die Operatorfunktion übergeben:

```
bool b = greater<int>()(2, 3);
```

Das binäre Prädikat *g* bzw. *greater()* kann im Unterschied zum Symbol *>* als Argument an eine Funktion übergeben werden, da *greater* ein Bezeichner ist, aber *>* nicht.

Für die elementaren Vergleichsoperatoren sind nach

```
#include <functional>
```

ähnliche binäre Prädikate definiert, die sich nur im Rückgabewert unterscheiden:

| Name                 | return     | Name               | return     |
|----------------------|------------|--------------------|------------|
| <i>greater</i>       | $x > y$    | <i>not_equal</i>   | $x \neq y$ |
| <i>less</i>          | $x < y$    | <i>logical_and</i> | $x \&\&y$  |
| <i>greater_equal</i> | $x \geq y$ | <i>logical_or</i>  | $x    y$   |
| <i>less_equal</i>    | $x \leq y$ | <i>logical_not</i> | $!x$       |
| <i>equal_to</i>      | $x == y$   |                    |            |

Einige Algorithmen der Standardbibliothek haben Template-Parameter mit dem Namen **Compare**:

```
template<class RandomAccessIterator, class Compare>
void sort(RandomAccessIterator first, RandomAccessIterator last, Compare comp);
```

Hier stehen *first* und *last* für Iteratoren aus einem Container, die den Bereich beschreiben, der sortiert werden soll (wenn der ganze Container *v* sortiert werden soll, *v.begin()* und *v.end()*). Der Typparameter *Compare* bezeichnet eine **Vergleichsfunktion**. Das Argument für *comp* kann eine Funktion oder ein Funktionsobjekt (z.B. ein binäres Prädikat) mit zwei Parametern des Datentyps der Container-Elemente und dem Rückgabotyp *bool* sein.

Beispiel: Um einen Container mit *int*-Elementen

```
vector<int> v = { 3,1,5,1,7 };
```

absteigend zu sortieren, kann man *sort* eine Funktion, ein Funktionsobjekt oder das vordefinierte Prädikat *greater* übergeben:

```
bool absteigend(int a, int b)
{
    return a > b;
}

struct Absteigend {
    bool operator()(int a, int b)
    {
        return a > b;
    }
};

std::sort(v.begin(), v.end(), absteigend); // v = { 7, 5,
3, 1, 1 }
std::sort(v.begin(), v.end(), Absteigend());
std::sort(v.begin(), v.end(), std::greater<int>());
```

Das Argument für den Parameter *comp* muss die folgenden Anforderungen erfüllen, die im C++-Standard als „**strict weak ordering**“ („strenge schwache Ordnung“) bezeichnet werden (siehe Abschnitt 15.8.2):

- $\text{comp}(x,x) == \text{false}$  für alle *x* (d.h. *comp* ist irreflexiv).
- aus *comp(a,b)* und *comp(b,c)* folgt *comp(a,c)* (d.h. *comp* ist transitiv).
- Definiert man *equiv(a,b)* durch  $\neg(\text{comp}(a,b) \ \&\& \ \text{comp}(b,a))$ , muss *equiv* transitiv sein, d.h. aus *equiv(a,b)* und *equiv(b,c)* folgt *equiv(a,c)*

Falls diese Voraussetzungen nicht erfüllt sind, kann das Ergebnis von *sort* eine falsche Sortierfolge sein. Im Debug-Modus erkennt der *sort*-Algorithmus oft, dass sie nicht erfüllt sind und gibt zur Laufzeit eine Fehlermeldung aus.

Beispiel: Wegen a) wird durch die Operatoren *<=* oder *>=* bzw. Vergleichsfunktionen wie

```
bool GroesserGleich(int a, int b)
{
    return a >= b;
}
```

keine strenge schwache Ordnung definiert, da *GroesserGleich*(*x*,*x*) den Wert *true* hat.

Die Operatoren < oder > bzw. Funktionen wie *Groesser* erfüllen dagegen die Anforderungen an eine strenge schwache Ordnung. Die Voraussetzung c) sieht schlimmer aus als sie ist. Sie bedeutet bei dem Operator <, dass *equiv*(*a*,*b*) dem Ausdruck *a==b* entspricht:

$$\text{equiv}(a,b) = \neg(a < b) \ \&\& \ \neg(b < a) = (a \geq b) \ \&\& \ (b \geq a) = (a == b)$$

Mit diesem Ausdruck gilt tatsächlich, dass aus *equiv*(*a*,*b*) und *equiv*(*b*,*c*) auch *equiv*(*a*,*c*) folgt.

Strings des Datentyps *string* kann man mit einem Prädikat wie *greater<string>()* oder mithilfe der Elementfunktion *compare* und nullterminierte Strings mithilfe von *strcmp* sortieren.

Beispiel: Einen Container mit Strings kann man mit einem binären Prädikat sortieren, das zwei Strings als Parameter hat:

```
bool absteigend(string s1, string s2)
{ // mit >= 0 erhält man keine streng schwache Ordnung
  return s1.compare(s2)>0;
}

bool aufsteigend(const char* s1, const char* s2)
{ // mit <= 0 erhält man keine streng schwache Ordnung
  return strcmp(s1, s2)<0;
}
```

Da für den Datentyp *string* auch der Operator < definiert ist, kann man sich solche Definitionen auch sparen und stattdessen das vordefinierte Prädikat verwenden:

```
greater<string>()
```

Eine **mehrstufige Sortierung** erreicht man, indem man die Werte in der Reihenfolge ihrer Bedeutung vergleicht, und dabei jeweils bei Ungleichheit das Ergebnis der Anordnung zurückgibt. Falls alle verglichenen Werte gleich sind, gibt man am Ende *false* zurück.

Beispiel: Ein Container mit Elementen des Typs

```
struct Datum
{
    int Tag, Monat, Jahr;
};
```

wird aufsteigend sortiert mit

```
bool sortiere_Datum_aufsteigend(Datum d1, Datum d2)
{
    if (d1.Jahr != d2.Jahr)
        return (d1.Jahr < d2.Jahr);
    if (d1.Monat != d2.Monat)
        return (d1.Monat < d2.Monat);
    if (d1.Tag != d2.Tag)
        return (d1.Tag < d2.Tag);
    return false;
}
```

### Aufgabe 13.2

1. Geben Sie für die folgenden Container jeweils eine Funktion und ein Funktionsobjekt an, das `std::sort` als Argument für `comp` übergeben werden kann:

- a) `vector<int> vi;`
- b) `vector<string> vs;`
- c) `vector<FileInfo> vf;`
- d) `vector<FileInfo*> vp;`

Hier soll die Klasse `FileInfo` Informationen über eine Datei enthalten und folgendermaßen definiert sein.

```
struct FileInfo {
    string Name; // Name der Datei
    long long Length; // Dateigröße
};
```

Definieren Sie Argumente für `comp` so, dass die Dateien in `vf` und `vp` in dieser Reihenfolge sortiert werden:

- e) aufsteigend nach ihrer Dateigröße (Eigenschaft `Length`)
  - f) absteigend nach ihrer Dateigröße
  - g) aufsteigend nach ihrem Dateinamen (Eigenschaft `Name`)
  - h) absteigend nach ihrem Dateinamen.
2. Ein Container mit Strings soll Meldungen der Art

```
vector<string> Meldungen = {
    "2.12.2015, 2.15: Fehler 0815: Festplatte voll",
    "2.2.2016, 2.18: Warnung: LAN-Kabel abgezogen",
    "2.2.2016, 2.19: Info: Keine Internetverbindung",
    "2.2.2016, 3.18: Info: LAN-Verbindung neu aufgebaut",
    "3.4.2016, 20.25: Fehler 0816: Kein Strom",
    "12.6.2016, 3.32: Fehler 0715: CPU zu heiß",
    "12.6.2016, 4.08: Fehler 0716: CPU zu kalt"
};
```

enthalten. Dabei soll in jeder Meldung die Zeichenfolge „: Fehler“ bzw. „: Info“ bzw. „: Warnung“ nur einmal enthalten sein.

Schreiben Sie eine Funktion, die *sort* übergeben werden kann, so dass *Meldungen* so sortiert wird, dass zuerst alle Fehler, dann alle Warnungen und dann alle Infos kommen.

### 13.3 Binder $\Theta$

In älteren C++-Compilern waren die in diesem Kapitel vorgestellten Binder oft notwendig, um Funktionen an STL-Algorithmen zu übergeben. Neuere Compiler ermöglichen das mit Lambda-Ausdrücken oft einfacher. Da diese Binder gute Beispiele für Funktionsobjekte sind, und diese auch trotz Lambda-Ausdrücken gelegentlich hilfreich sind, werden die wichtigsten Konzepte kurz vorgestellt. Die Beispiele aus diesem Abschnitt werden im nächsten Abschnitt mit Lambda-Ausdrücken wiederholt, damit man die Unterschiede zwischen diesen beiden Konzepten explizit sieht.

Die an einen STL-Algorithmus übergebenen Funktionen bzw. Funktionsobjekte müssen immer mit derselben Anzahl von Argumenten aufgerufen werden können, mit der sie im Algorithmus aufgerufen werden.

Beispiel: Die Funktion

```
std::vector<string>::iterator
find_if(std::vector<string>::iterator first,
        std::vector<string>::iterator last,
        std::function<bool(string)> pred)
{
    while (first != last && !pred(*first)) ++first;
    return first;
}
```

und der am Anfang von Abschnitt 13.2 vorgestellte Algorithmus *find\_if* der Standardbibliothek

```
template <class InputIterator, class Predicate>
InputIterator find_if(InputIterator first, InputIterator
last, Predicate pred)
{
    while (first != last && !pred(*first)) ++first;
    return first;
}
```

erwarten für *pred* eine Funktion oder ein Funktionsobjekt, das mit genau einem Argument aufgerufen werden kann.

Diese Anforderung schränkt die Anwendbarkeit der Algorithmen auf den ersten Blick ein, da man *find\_if* keine Funktion mit einer anderen Anzahl von Argumenten übergeben kann.

Beispiel: Wenn man mit *find\_if* in einem Container mit Strings nach dem ersten Element suchen will, das mit einer bestimmten Zeichenfolge beginnt, kann man für *pred* keine Funktion mit zwei Parametern übergeben, die als zweiten Parameter den Startwert hat:

```
bool StartsWith(string s, string start)
{
    bool result = false;
    if (s.length() >= start.length())
    {
        result = s.substr(0, start.length()) == start;
    }
    return result;
}
```

Solche Einschränkungen kann man mit einem Funktionsobjekt umgehen, das einen der beiden Parameter als Datenelement enthält und dessen Aufrufoperator das Argument mit diesem Wert vergleicht. Ein solches Funktionsobjekt wird auch als **Binder** bezeichnet, da es einen der beiden Parameter als Datenelement bindet.

Beispiel: Der Funktor *StartsWith* initialisiert das Datenelement *start* im Konstruktor mit dem Konstruktor-Argument:

```
class StartsWith
{
    string start;
public:
    StartsWith(string s) :start(s) {}
    bool operator()(string s)
    {
        bool result = false;
        if (s.length() >= start.length())
        {
            result = s.substr(0, start.length()) == start;
        }
        return result;
    }
};
```

Der Aufrufoperator vergleicht dann das Argument mit diesem Datenelement. Da der Aufrufoperator mit einem Argument aufgerufen werden kann, kann man ein Funktionsobjekt der Klasse *StartsWith* an *find\_if* übergeben und so das erste Element suchen, das mit dem beim Anlegen des Objekts gesetzten String beginnt:

```
auto p = std::find_if(v.begin(), v.end(), StartsWith("123"));
```

Binder werden wie hier oft als temporäres Objekt übergeben.

Ein Binder ermöglicht also den Aufruf einer Funktion über ein Funktionsobjekt einer geringeren Anzahl von Argumenten. Die fehlenden Argumente werden dem Funktionsobjekt



meist im Konstruktor übergeben. Damit kann einem Algorithmus, der eine Funktion mit einem Argument aufruft, eine Funktion mit mehr als einem Parameter übergeben werden.

Da Binder in der Standardbibliothek öfter benötigt werden, gibt es die Funktions-Templates **bind**

```
template<class F, class... BoundArgs>
    unspecified bind(F&& f, BoundArgs&&... bound_args);

template<class R, class F, class... BoundArgs>
    unspecified bind(F&& f, BoundArgs&&... bound_args);
```

die ein solches Funktionsobjekt zurückgeben. Es steht nach

```
#include <functional>
```

im Namensbereich *std* zur Verfügung. **bind** erzeugt aus einer Funktion (bzw. aus einem Funktionszeiger, Funktionsobjekt und Zeiger auf eine Elementfunktion), die als erstes Argument übergeben wird, ein Funktionsobjekt.

Beispiel: Mit der Funktion

```
int f(int a, int b, int c)
{
    return 100 * a + 10 * b + c;
}
```

ist *bind(f,1,2,3)* ein Funktionsobjekt ohne Parameter, das *f(1,2,3)* zurückgibt:

```
auto f1 = std::bind(f, 1, 2, 3);
int r1=f1(); // r1 == 123
```

**Platzhalter (Placeholder)** sind Datentypen mit den Namen *\_1*, *\_2* usw. (mindestens 10), die im Namensbereich *std::placeholders* definiert sind und die man *bind* übergeben kann. Jeder solche Platzhalter steht dann für einen Parameter, den man dem *bind*-Funktionsobjekt übergeben kann. Der erste Parameter des *bind*-Funktionsobjekts wird dann an der Position des Platzhalters *\_1*, der zweite an der Position des Platzhalters *\_2* usw. übergeben.

Beispiel: Mit der Funktion *f* des letzten Beispiels sind die nächsten beiden Ausdrücke Funktionsobjekte, die man mit einem bzw. zwei Argumenten aufrufen kann:

```
using namespace std::placeholders;
auto f2 = std::bind(f, 1, 2, _1); // ein Parameter, da ein
                                // Platzhalter
auto f3 = std::bind(f, 1, _2, _1); // zwei Parameter, da zwei
                                // Platzhalter
```

Die beim Aufruf des Funktionsobjekts angegebenen Argumente werden dann der Reihe nach den Platzhaltern zugeordnet: Das erste Argument dem Platzhalter *\_1*, das zweite dem Platzhalter *\_2* usw.

Beispiel: Mit den Funktionsobjekten des letzten Beispiels entsprechen diese beiden Ausdrücke den als Kommentar angegebenen Funktionsaufrufen:

```
int r2 = f2(3); // r2 == 123
int r3 = f3(3,4); // r3 == 143
```

Mit *bind* und Platzhaltern kann man Funktionen usw. an Algorithmen übergeben, die eine andere Anzahl von Parametern haben als die im Algorithmus aufgerufenen. Dazu übergibt man dem *bind*-Ausdruck so viele Platzhalter, wie die im Algorithmus aufgerufene Funktion Argumente braucht.

Beispiel: Mit den Definitionen

```
bool groesser(int x, int y)
{
    return x > y;
}

vector<int> v = { 1,2,3,4,5 };
int x = 3;
```

gibt der nächste Aufruf von *find\_if* die Position des ersten Elements in *v* zurück, das größer als der Wert von *x* ist:

```
using namespace std::placeholders;
vector<int>::iterator p = find_if(v.begin(), v.end(),
                                bind(groesser, _1, x));
```

In den bisherigen Beispielen wurden nur globale Funktionen und Funktionsobjekte als Parameter übergeben. Die Übergabe von Elementfunktionen wird in Abschnitt 8.2.14 gezeigt.

*bind* und *mem\_fn* wurden relativ spät in C++ aufgenommen. Vorher gab es *binder1st*, *bind1st*, *bind2nd*, *ptr\_fun*, *mem\_fun*. Diese sind inzwischen überflüssig und sollten nicht mehr verwendet werden.

## 13.4 Lambda-Ausdrücke

Wenn man in älteren C++-Versionen einer Funktion wie

```
void for_each(std::vector<int> v, std::function<void(int)> f)
{
    for (auto& i : v)
        f(i);
}
```

oder einem STL-Algorithmus wie *for\_each* ein Argument für *f* übergeben will, muss man eine Funktion wie

```
void print(int v)
{
    cout << v << endl;
}
```

schreiben und diese dann dem Algorithmus übergeben:

```
vector<int> v = { 1,3,5,7 };
for_each(v, print);
```

Eine solche Funktion hat nur den Sinn und Zweck, als Argument bei *for\_each* eingesetzt zu werden. Sie wird meist nur ein einziges Mal aufgerufen, und deshalb ist es etwas lästig, dafür einen eigenen Namen zu suchen und die etwas umständliche Funktionssyntax einzuhalten. Oft hat man viele solche Funktionen, und die stehen dann auf einer anderen Bildschirmseite als der Aufruf, so dass man hin- und her blättern muss, um zu sehen, was genau passiert.

Hier bieten Lambda-Ausdrücke eine Vereinfachung. Ein **Lambda-Ausdruck** stellt im Wesentlichen eine Funktion (genauer: ein Funktionsobjekt) dar, die keinen Namen hat. Man spricht deshalb auch von **anonymen Funktionen**. Ein Lambda-Ausdruck wird im einfachsten Fall durch `[]` eingeleitet. Darauf folgen wie bei einer Funktion eine Parameterliste und ein Anweisungsteil.

```
[](Parameterliste){Anweisungen}
```

Auch wenn ein Lambda-Ausdruck auf den ersten Blick vielleicht ein wenig kryptisch aussieht: Bis auf die eckigen Klammern am Anfang hat ein Lambda-Ausdruck große Ähnlichkeiten mit einer Funktion. Er unterscheidet sich von einer benannten Funktion im Wesentlichen nur dadurch, dass er mit `[]` beginnt, keinen Namen und keinen Rückgabotyp hat. Der Compiler leitet den **Rückgabotyp** aus den Anweisungen zwischen `{ }` ab. Er ist dann der Datentyp des *return*-Ausdrucks oder *void*, falls sie kein *return* enthalten.

Beispiel: Der Lambda-Ausdruck

```
[](int i) {cout << i << endl; }
```

stellt eine Funktion mit einem *int*-Parameter und dem Rückgabotyp *void* dar, da unter den Anweisungen keine *return*-Anweisung enthalten ist. Er kann deshalb wie die *print*-Funktion von oben verwendet werden:

```
for_each(v, [](int i) {cout << i << endl; });
```

Der Aufruf von *for\_each* mit diesem Lambda-Ausdruck hat dasselbe Ergebnis wie der Aufruf von *for\_each* mit *print*.

Ein Lambda-Ausdruck kann auch direkt aufgerufen werden. Das ist zwar nur selten sinnvoll, aber es geht:

```
[](int i) {cout << i << endl; }(5);
```

Dieses Beispiel zeigt bereits einen ersten wichtigen Aspekt von Lambda-Ausdrücken: Ein Lambda-Ausdruck wird an der Stelle definiert, an der er aufgerufen wird, und vermeidet so die oben für *print* genannten Nachteile.

Bei einem Lambda-Ausdruck mit einer leeren Parameterliste kann man die **Parameterliste** auch **auslassen**. Das sieht auf den ersten Blick wie eine unnötige syntaktische Spitzfindigkeit aus. Da wir aber später sehen, dass solche Lambda-Ausdrücke sehr häufig vorkommen, hat diese kleine Reduktion der Schreibarbeit durchaus ihre Berechtigung.

Beispiel: Da im Lambda-Ausdruck

```
[]() { cout << "Hello World" << endl; };
```

keine Parameter verwendet werden, kann man die Parameterliste auch weglassen.

```
[] { cout << "Hello World" << endl; };
```

Der kürzeste Lambda-Ausdruck ist

```
[]{};
```

Dieser kann so aufgerufen werden (eine Kombination aller Klammern):

```
[]{}(); // eine originelle Möglichkeit, nichts zu tun
```

Klammerfetischisten können sich mit noch mehr Klammern entfalten:

```
[](){}(); // noch mehr Klammern, die nichts zu tun
```

Genau genommen ist ein Lambda-Ausdruck aber keine Funktion. Vielmehr erzeugt der Compiler aus einem solchen Ausdruck ein **Funktionsobjekt** und ruft es dann auf (siehe Abschnitt 13.5.1). Der Datentyp des Lambda-Ausdrucks ist der Datentyp des dabei erzeugten Funktionsobjekts. Dieser Datentyp ist aber **nur** dem Compiler bekannt. Deswegen kann er nur mit *auto* zur Definition einer Variablen verwendet werden. Man kann einen Lambda-Ausdruck aber einem kompatiblen *function*-Objekt zuweisen. Eine solche Variable kann wie eine Funktion aufgerufen werden.

Beispiel: Die Zuweisungen in der Funktion *lokale\_Lambdas* sollen nur zeigen, wie ein Lambda-Ausdruck einer Variablen zugewiesen werden kann, und dass diese wie eine Funktion aufgerufen werden kann:

```
void lokale_Lambdas()
{
    std::function<double(double)> f0=[](double x) {return 1; };
    auto f1 = [](double x) {return x; };
    auto f2 = [](int n) { return "abc"; };
    double d0 = f0(1);
    double d1 = f1(1);
    std::string r2 = f2(3);
    auto add = [](int x, int y) {return x + y; };
```

```
// auto add = [](string x, string y) {return x + y; }; //
// Fehler: Überladen geht nicht
int x = add(2, 3);
}
```

Ein Lambda-Ausdruck kann lokal in einer Funktion definiert und einer lokalen Variablen zugewiesen werden. Diese Variable ist dann ein Name für die anonyme Funktion und kann wie eine Funktion aufgerufen werden. Das heißt, das ist im Wesentlichen eine **lokale Funktion**. Das ist ein **zweiter wesentlicher Unterschied** zwischen einer benannten Funktion und einer anonymen Funktion: Eine benannte Funktion kann nicht lokal definiert werden. Lokale Funktionen sind dann sinnvoll, wenn eine Funktion nur innerhalb einer Funktion benötigt wird und innerhalb der Funktion mehrfach aufgerufen werden soll. Eine solche lokale Funktion definiert man am einfachsten mit *auto*.

Beispiel: Der Lambda-Ausdruck (eine anonyme Funktion) bekommt durch die Zuweisung an die lokale Variable *f* einen Namen. *f* kann dann wie eine lokale Funktion aufgerufen werden:

```
void lokaleFunktion()
{
    auto f = [](int x, int y) { return x + y; };
    int r1 = f(1, 2);
    int r2 = f(3, 4);
}
```

Normalerweise verwendet man anonyme Funktionen aber nicht dazu, sie einer Variablen zuzuweisen. Vielmehr setzt man sie meist als Argumente für einen Parameter eines kompatiblen Funktionstyps ein, wie im Beispiel oben mit *for\_each*. Dann steht die Definition genau an der Stelle, an der sie auch verwendet wird.

Ein weiterer entscheidender Unterschied zu gewöhnlichen Funktionen ist, dass man in einem Lambda-Ausdruck **lokale Variablen** aus dem umgebenden Gültigkeitsbereich ansprechen kann. Dazu gibt man die Variablen in der sogenannten **Erfassungsliste** (engl. **capture list**) zwischen den eckigen Klammern an. Mit dem Symbol **&** vor dem Namen kann man festlegen, dass die Variable als Referenz übergeben wird. Das bedeutet, dass sie im Lambda-Ausdruck verändert werden kann. Ohne **&** vor dem Namen wird sie als Wert übergeben und kann nicht verändert werden.

Auf **globale Variablen** kann man zugreifen, auch ohne dass man sie in einer Erfassungsliste angibt.

Beispiel: Der Lambda-Ausdruck in

```
void PrintAndCount(vector<int> v)
{
    int count = 0;
    for_each(v, [&count](int i)
        {cout << i << endl; count++; });
    cout << "count = " << count << endl;
}
```

greift auf die Variable *count* zu. Diese wird im Anweisungsteil des Lambda-Ausdrucks mit jeder Ausführung des Schleifenkörpers hochgezählt, so dass am Ende die Anzahl der Container-Elemente ausgegeben wird. In

```
void PrintAndCount(vector<int> v, std::string msg)
{
    int count = 0;
    for_each(v, [&count, msg](int i)
        {cout << msg << i << endl; count++;});
    cout << "count = " << count << endl;
}
```

wird auf die Variable *count* als Referenz und auf die Variable *msg* als Wert zugegriffen.

Gibt man in einer Erfassungsliste das Symbol & ohne einen Namen an, können alle lokalen Variablen verändert werden. Mit dem Symbol = werden alle lokalen Variablen als Wert übergeben und können nicht verändert werden. Die Zugriffsarten können flexibel kombiniert werden. So sind z.B. mit einer lokalen Variablen *x* die folgenden Erfassungslisten möglich:

```
[=] // Zugriff auf alle lokalen Variablen als Wert
[&] // Zugriff auf alle lokalen Variablen als Referenz
[=, &x] // Zugriff auf alle außer x als Wert, auf x per Referenz
[&, x] // Zugriff auf alle außer x als Referenz, auf x per Wert
```

Die zweite Variante mit & reicht oft aus.

Damit man in einer Elementfunktion auf die Datenelemente der Klasse zugreifen kann, gibt man in der **Erfassungsliste** *this* an. Damit erhält man nicht nur einen Zugriff auf den *this*-Zeiger, sondern auf alle nicht statischen Elemente der Klasse.

Beispiel: In dem Lambda-Ausdruck in

```
class Lambda {
    int x, y;
    void f()
    {
        auto lam = [this] {x = 1; y = 2; };
    }
};
```

kann man auf die Datenelemente der Klasse zugreifen. Ohne *this* in der Erfassungsliste erhält man Fehlermeldungen des Compilers

```
auto lam = [] {x = 1; y = 2; }; // Fehler: Zugriff auf x
                                und y
auto lam = [x, y] {x = 1; y = 2; }; // Fehler: x und y sind
                                    keine Variablen
```

Es ist nicht möglich, ein Objekt in der Erfassungsliste als Wert zu übergeben und dann eine Elementfunktion aufzurufen, außer man gibt nach der Parameterliste *mutable* an. Dann wird das Objekt in der nur im Lambda-Ausdruck verändert, bleibt aber außerhalb unverändert.

Beispiel: Mit der Klasse Lambda aus dem letzten Beispiel:

```
Lambda lbd; // Lambda aus dem letzten Beispiel
auto f1 = [lbd]() {lbd.f(); }; // Fehler
auto f2 = [lbd]() mutable {lbd.f(); };
```

Mit *&lbd* in der Erfassungsliste wird das Objekt außerhalb des Lambda-Ausdrucks verändert.

Bei Variablen, die als Wert erfasst werden, muss man beachten, dass sie den Wert verwenden, den sie bei der Definition des Lambda-Ausdrucks haben, und nicht den beim Aufruf des Lambda-Ausdrucks. Bei einer Referenz besteht dieser **Fallstrick** nicht, da hier der aktuelle Wert verwendet wird. Der Grund für dieses Verhalten ist, dass aus dem Lambda-Ausdruck ein Funktionsobjekt erzeugt wird. Werte, die per Wert erfasst werden, werden in dieses Objekt kopiert.

Beispiel: In der Funktion

```
void Erfassen_per_Wert_kopiert()
{
    int i = 10, j = 5;
    auto f = [i, &j] { return i + j; };
    // Ändere die Werte von i und j.
    i = 20;
    j = 7;
    int r = f(); // r=10+7=17
}
```

erhält r den Wert 17, und nicht etwa 27, wie man vielleicht erwartet. Hätte man i auch per Referenz übergeben, wäre das Ergebnis 27.

Da man in einem Lambda-Ausdruck auf umgebende Variablen zuzugreifen kann, sind Lambda-Ausdrücke universeller einsetzbar als Funktionen. Dadurch kann man in einem Lambda-Ausdruck auf Variablen zugreifen, die nicht als Parameter übergeben werden. Das ist mit gewöhnlichen Funktionen nicht möglich. Damit kann man einer Funktion, die einen Parameter des Typs

```
std::function<void(void)> f
```

hat, als Argument einen Lambda-Ausdruck übergeben, in dessen Anweisungsteil eine Funktion mit einer beliebigen Parameterliste und einen beliebigen Rückgabebetyp aufgerufen wird.

Angenommen, Sie wollen eine Funktion *StartThread* schreiben, der Sie Funktionen mit und ohne Rückgabewert, mit keinem, einem oder mehreren Parametern übergeben können, die

beliebige Datentypen haben. Ohne Lambda-Ausdrücke wären dafür Varianten mit allen Signaturen notwendig, wie z.B.

```
void StartThread(std::function<void(void)> f) { f(); }
void StartThread(std::function<void(int)> f) { f(1); }
int StartThread(std::function<int(void)> f) { return f(); }
int StartThread(std::function<int(int)> f) { return f(1); }
// usw., alle Kombinationen von Parameter- und Rückgabetyphen
```

Dieser Aufwand ist in der Praxis nicht vertretbar. Mit Lambda-Ausdrücken reicht dagegen eine einzige Funktion

```
void StartThread(std::function<void(void)> f) { f(); }
```

aus. Dieser Funktion übergibt man dann einen Lambda-Ausdruck, in dessen Anweisungsteil die Funktion aufgerufen wird, die gestartet werden

Beispiel: Die Funktionen

```
void f1() {}
void f2(int x) { }
int f3() { return 0; }
int f4(int x) { return x+1; }
```

können in *StartThread*

```
void StartThread(std::function<void(void)> f) { f(); }
```

aufgerufen werden:

```
void callStartThread()
{
    int x = 0, result = 0;
    StartThread([] { f1(); });
    StartThread([x] { f2(x); });
    StartThread([&result] { result = f3(); });
    StartThread([&result, x] { result = f4(x); });
}
```

Die Klasse *thread* der Standardbibliothek kann man im Wesentlichen genauso verwenden.

Damit eine Funktion mit Argumenten eines beliebigen Funktionstyps aufgerufen werden kann, reicht ein Parameter des Typs *std::function<void(void)>* aus. Als Argument wird dann ein Lambda-Ausdruck übergeben, in dem die Funktion aufgerufen wird. Da das Argument eine leere Parameterliste hat, kann man das Klammerpaar *()* für die leere Parameterliste weglassen.



Als konkrete Anwendung soll jetzt eine Klasse *BenchmarkTimer* entwickelt werden, mit der man die Laufzeit von Anweisungen messen und anzeigen kann. Mit dieser Klasse wurden alle Benchmarks in diesem Buch ausgeführt.

Im einfachsten Fall kann diese Klasse etwa folgendermaßen aussehen:

```
class BenchmarkTimer {
    // #include <chrono>
    // Seit VS 2017 sind steady_clock und high_resolution_clock
    // synonym: using high_resolution_clock = steady_clock;
    using TimePointType = std::chrono::system_clock::time_point;
    using TimeDurationType = std::chrono::duration<double>;
    TimePointType start_, end_;
    string bench_id; // Bezeichnung, um die Benchmarks zu unterscheiden

    TimePointType Now()
    { // aktuelle Zeit, wie nach #include <Windows.h>
      // mit QueryPerformanceCounter
      return std::chrono::steady_clock::now();
    }

public:

    BenchmarkTimer(std::string id) : bench_id(id), start_(Now()),
                                     end_(Now()) { }

    void Start() { start_ = Now(); }
    void End() { end_ = Now(); }

    void ShowDuration()
    {
        TimeDurationType sec = end_ - start_;
        std::string text1 = bench_id + " Elapsed time: " +
                           std::to_string(sec.count()) + " secs";
        std::cout << text1 << std::endl;
    }
};
```

Sie kann folgendermaßen verwendet werden:

```
int n = 1'000'000'000;
BenchmarkTimer t1("for-Schleife, n=" + std::to_string(n));
t1.Start();
int sum = 0;
for (int i = 0; i < n; i++)
    sum = sum + i;
t1.End();
t1.ShowDuration();
```

und gibt dann eine Meldung aus wie

for-Schleife, n=1000000000 Elapsed time: 2.691154 secs

Mit diesem Konstruktor

```
BenchmarkTimer(std::string id, std::function<void(void)> f)
               : bench_id(id)
{
    Start();
    f();
    End();
}
```

wird dann ein Benchmark etwas einfacher, da man die Aufrufe von *Start* und *End* nicht mehr angeben muss und die zu messenden Anweisungen als Lambda-Ausdruck übergeben kann:

```
int sum = 0;
BenchmarkTimer t1("for-Schleife, n=" + std::to_string(n),
    [&sum, n] { for (int i = 0; i < n; i++)
                sum = sum + i;
            });
t1.ShowDuration();
```

### Aufgabe 13.4

1. a) Weisen Sie Variablen der folgenden *function*-Typen

```
function<void(void)>;
function<int (double x, string y)>;
function<double(int x)>;
function<string(int x)>;
```

passende Lambda-Ausdrücke zu und rufen Sie die Variable anschließend auf.

- b) Die Funktion *f* soll so

```
void f(function<int(int)>) { }
```

definiert sein. Welche der folgenden Aufrufe werden vom Compiler akzeptiert?

```
f([](int x){ return x+1});
f([](int x){ return x+1;});
f([](int x){ return x+1;});
f([](){ return 3.14;});
f([] x { return x+1});
f([](int x) return x+1;
```

Geben Sie für jeden zulässigen Lambda-Ausdruck aus b) ein *function*-Objekt an, das dem Lambda-Ausdruck zugewiesen werden kann.

2. Lösen Sie von Aufgabe 13.2 die Teile 1. e) bis f) und 2. mit Lambda-Ausdrücken.

## 13.5 Lambda-Ausdrücke – Weitere Konzepte Θ

Die Ausführungen im letzten Abschnitt enthalten die wichtigsten Themen, die für die Arbeit mit Lambda-Ausdrücken notwendig sind. Für die meisten Anwendungen dürften diese ausreichend sein. In diesem Abschnitt werden einige Themen und Hintergründe zusammengefasst, die nicht so oft von Bedeutung sind, aber im Einzelfall doch wichtig sein können.

### 13.5.1 Lambda-Ausdrücke werden zu Funktionsobjekten

Der Compiler erzeugt aus einem Lambda-Ausdruck einen Funktor. Der Anweisungsteil des Lambda-Ausdrucks wird dabei zum Anweisungsteil der *operator()*-Funktion. Von dieser Klasse erzeugt der Compiler dann ein Objekt (das gelegentlich auch als *closure* bezeichnet wird) und übergibt es anstelle des Lambda-Ausdrucks.

Beispiel: Aus dem Lambda-Ausdruck in

```
for_each(v, [](double i) {cout<<i<<endl; });
```

erzeugt der Compiler eine Klasse wie

```
class _Name_ { // ein vom Compiler erzeugter Name
public:
    void operator()(double i) {cout<<i<<endl; }
};
```

und davon ein Objekt. Dieses wird dann *for\_each* übergeben:

```
_Name_ lbd;
for_each(v, lbd);
```

Den Namen dieser Klasse kann man sich mit *typeid* (nach `#include <type_info>`)

```
auto lbd1=[](double i) {cout<<i<<endl; };
cout<<"lbd1: "<<typeid(lbd1).name()<<endl;
```

anzeigen lassen. Hier erhält man mit Visual Studio eine Ausgabe wie

```
lbd1: class <lambda_ec1e285cc3c795f94156e80d6f0c9dd9>
```

Für jeden Ausdruck in der Capture-Liste nimmt der Compiler ein Datenelement in die erzeugte Klasse auf. Dabei werden die mit `=` angegebenen Variablen als Wert-Elemente aufgenommen, und die mit `&` angegebenen als Referenzen. Außerdem erhält die Klasse einen Konstruktor, der diese Elemente initialisiert.

Beispiel: Die aus dem Lambda-Ausdruck in

```
int count = 0;
string msg = "i=";
for_each(v, [&count, msg](double i)
    {cout << msg << i << endl; count++; return count; });
```

erzeugte Klasse sieht etwa folgendermaßen aus:

```
class _Name_2 {
    int& count;
    string msg;
public:
    _Name_2(int& c, string s):count(c),msg(s){}
    int operator()(double i) {cout<<msg<<i<<endl;count++;
                                return count;};
};
```

Von dieser Klasse wird dann ein Objekt erzeugt. Dabei werden dem Konstruktor die Werte aus der Erfassungsliste übergeben. Dieses Objekt wird dann als Argument für den Lambda-Ausdruck übergeben:

```
_Name_2 lbd2(count, msg);
for_each(v, lbd2);
```

Lambda-Ausdrücke spielen mit Templates und Exception-Handling ohne Sonderregeln zusammen.

### 13.5.2 Nachstehende Rückgabetypen

Falls der Compiler keinen Rückgabetypp ableiten kann, oder man einen anderen will als den, den der Compiler abgeleitet hat, kann man den Datentyp des Rückgabewertes als **nachstehender Rückgabetypp** (trailing return type) nach der Parameterliste und einem  $\rightarrow$  angeben.

Beispiel: Bei dem Lambda-Ausdruck

```
double r3=[](int i) { if (i > 10) return 0; return 1.0; }(6);
```

kann der Compiler nicht entscheiden, ob er als Rückgabetypp *int* oder *double* wählen soll. Dieser Lambda-Ausdruck wird deshalb nicht kompiliert. Mit einem nachstehenden Rückgabetypp

```
double r4 = [](int i) -> double { if (i > 10) return 0; return
                                1.0; }(6);
```

wird der Ausdruck dagegen kompiliert.

Bei diesem Beispiel wäre es aber vermutlich besser, in beiden *return*-Anweisungen Werte desselben Typs zurückzugeben.

### 13.5.3 Generische Lambda-Ausdrücke

Bei der Definition eines Lambda-Ausdrucks kann seit man C++14 für den Datentyp des Parameters *auto* angeben. Dann leitet der Compiler den Datentyp des Parameters aus dem Datentyp der Argumente ab. Mit

```
auto plus = [](auto x, auto y) {return x + y;};
```

sind die folgenden Aufrufe möglich:

```
string s1 = "s1", s2 = "s2";
int x = plus(2, 3);
string s = plus(s1, s2);
```

Das ist meist etwas einfacher als ein entsprechendes Funktionstemplate. Allerdings bieten Funktionstemplates

```
template<typename T>
T plus(T x, T y) { return x + y; }
```

oft viele weitere Möglichkeiten, die für Lambda-Ausdrücke nicht zur Verfügung stehen.

Der Compiler erzeugt auf einem generischen Lambda eine Klasse mit einem Funktions-Template für den Aufrufoperator.

Beispiel: Für den generischen Lambda-Ausdruck *plus* von oben sieht das vom Compiler erzeugte Funktionsobjekt etwa folgendermaßen aus:

```
class Xyz
{
public:
    template<typename T, typename U>
    T operator () (T x, U y) const { return x+y; }
};
```

### 13.5.4 Lambda-Ausdrücke höherer Ordnung

Lambda-Ausdrücke können auch Lambda-Ausdrücke als Parameter oder Rückgabetypen haben. Solche Lambda-Ausdrücke werden auch als Lambda-Ausdrücke höherer Ordnung bezeichnet. Dazu verwendet man einen Parameter- bzw. Rückgabetypp mit *std::function*.

Beispiel: Einen Lambda-Ausdruck kann man mit einem nachstehenden Rückgabetypp zurückgeben:

```
auto plus = [](int x) -> std::function<int(int)> {
    return [=](int y) { return x + y; };
};
```

Ein Lambda-Ausdruck, dem man einen Lambda-Ausdruck als Parameter übergeben kann:

```
auto mal = [](const std::function<int(int)>& f, int z) {
    return f(z) * 2;
};
```

## 13.6 Kompatible *function*-Typen: Kovarianz und Kontravarianz $\Theta$

Damit *function*-Objekte einander zugewiesen werden können, müssen ihre Datentypen nicht gleich sein. Mit Klassen C, D, X, Y kann einem *function*-Objekt des Typs

```
std::function<C(D)>
```

ein *function*-Objekt des Typs

```
std::function<X(Y)>
```

zugewiesen werden,

- wenn C=X ist oder C Basisklasse von X ist (Kovarianz der Rückgabetypen) und
- wenn D=Y ist oder Y Basisklasse von D ist (Kontravarianz der Parametertypen)

Beispiel: Mit den Klassen

```
class C {};  
class D :public C {};
```

und den Definitionen

```
std::function<C(C)> fcc;  
std::function<C(D)> fcd;  
std::function<D(C)> fdc;  
std::function<D(D)> fdd;
```

sind neben den trivialen Zuweisungen mit gleichen Typen die folgenden Zuweisungen möglich:

```
// fcc = fcd; // geht nicht  
fcc = fdc; // das geht  
// fcc = fdd; // geht nicht  
  
fcd = fcc;  
fcd = fdc;  
fcd = fdd;
```

```
// fdc = fcc; // geht nicht  
// fdc = fcd; // geht nicht  
// fdc = fdd; // geht nicht  
  
// fdd = fcc; // geht nicht  
// fdd = fcd; // geht nicht  
fdd = fdc;
```

## 14 Templates

Templates sind Vorlagen für Funktionen oder Klassen, denen man als Parameter Datentypen übergeben kann. Aus einem Template und einem Argument für den Datentyp eines Parameters erzeugt der Compiler dann eine Funktion oder Klasse, die anstelle des Parameters das Argument als Datentyp enthält. Die Verwendung von Datentypen als Parameter bezeichnet man auch als **generische Programmierung**, und Templates auch als generische Funktionen bzw. Klassen, Schablonen oder Vorlagen.

Generische Programmierung bietet eine beträchtliche Flexibilität, die man allein aus der Verwendung von Datentypen als Parameter zunächst vielleicht gar nicht erwartet. Das sieht man insbesondere an den Containerklassen und Algorithmen der C++-Standardbibliothek, die alle mit Templates realisiert sind. Dieser Teil der Standardbibliothek wird deshalb auch als **STL** (Standard Template Library) bezeichnet. Die STL ist aber nicht nur eine Sammlung nützlicher Funktionen und Datenstrukturen (z.B. Container). Sie bietet durch ihre spezielle Architektur eine Allgemeinheit und Vielseitigkeit, die ohne Templates wohl kaum erreichbar ist. Das zeigt sich insbesondere daran, dass fast jeder Algorithmus mit jedem Container verwendet werden kann. Außerdem kann man leicht eigene Algorithmen definieren, die mit allen Containern funktionieren.

In diesem Kapitel wird gezeigt, wie man Funktions- und Klassen-Templates definieren und verwenden kann. Dazu werden oft Beispiele aus der STL verwendet, um zu zeigen, wie Templates dort eingesetzt werden. Dadurch erhält man ein tieferes Verständnis, wie man die STL verwenden kann. Da die STL in vielerlei Hinsicht vorbildlich ist, erhält man so auch Anregungen für eigene Templates.

Die STL wurde ursprünglich von Alexander **Stepanov** und Meng **Lee** entwickelt und Ende 1993 dem Standardisierungskomitee für C++ vorgestellt. Der Standard war damals kurz vor seiner Verabschiedung. Nach Plauger (1999, S. 10) waren die Teilnehmer von der STL derart beeindruckt, dass die Verabschiedung des Standards aufgeschoben und die STL 1994 als Teil der Standardbibliothek in den C++-Standard aufgenommen wurde. Die STL hat dann eine Flut von Änderungen des damaligen Entwurfs für den Standard ausgelöst. Als Folge wurden dann die Klassen für Strings, komplexe Zahlen, I/O-Streams usw. als Templates realisiert.

Um die Möglichkeiten und den Aufbau der STL zu zeigen, haben Stepanov und Lee eine Version der STL von 1995 frei zur Verfügung gestellt (siehe „<http://stepanovpapers.com/-butler.hpl.hp/stl/stl.zip>“). Diese stimmt zwar nicht mehr ganz mit dem aktuellen C++-Standard überein, zeigt aber die grundlegenden Konzepte oft besser. Da Teile aus ihr in den



Beispielen und Lösungen übernommen wurden und dort verlangt wird, die folgende „copyright notice“ abzdrukken, sei dieser Pflicht hiermit nachgekommen:

```
/*
 * Copyright (c) 1994
 * Hewlett-Packard Company
 *
 * Permission to use, copy, modify, distribute and sell this
 * software and its documentation for any purpose is hereby
 * granted without fee, provided that the above copyright
 * notice appear in all copies and that both that copyright
 * notice and this permission notice appear in supporting
 * documentation. Hewlett-Packard Company makes no
 * representations about the suitability of this software
 * for any purpose. It is provided "as is" without express
 * or implied warranty.
 */
```

Eine ausführliche Darstellung der STL findet man bei Jossutis (2012). Weitere Informationen über die STL findet man bei Meyers (2001) und über Templates bei Vandevoorde/Josuttis (2003).

## 14.1 Generische Funktionen: Funktions-Templates

Wenn ein Compiler eine Funktionsdefinition wie

```
void vertausche(int& a, int& b)
{
    int h = a;
    a = b;
    b = h;
}
```

übersetzt, erkennt er an den Datentypen der Parameter, wie viele Bytes er bei den einzelnen Zuweisungen in der Funktion kopieren muss. Deswegen kann diese Version der Funktion *vertausche* auch nicht dazu verwendet werden, die Werte von zwei Variablen anderer Datentypen als *int* zu vertauschen.

Eine Funktion, die die Werte von zwei *double*-Variablen vertauscht, kann aus denselben Anweisungen bestehen. Sie muss sich nur im Datentyp der Parameter und der lokalen Variablen *h* von der Funktion oben unterscheiden.

Mit einem **Funktions-Template** kann man sich nun die Arbeit ersparen, zwei Funktionen zu schreiben, die sich lediglich im Datentyp der Parameter unterscheiden. Ein solches Template wird ähnlich wie eine Funktion definiert und kann wie eine Funktion aufgerufen werden. Der Compiler erzeugt dann aus einem Funktions-Template eine Funktion mit den entsprechenden Datentypen und ruft diese Funktion dann auf. Anstelle von Funktions-Templates spricht man auch von generischen Funktionen, Funktionsschablonen oder Funktionsvorlagen.

Einem Template werden Datentypen als Parameter übergeben. Das erspart aber nicht nur Schreibarbeit, sondern ermöglicht auch, Algorithmen unabhängig von Datentypen zu formulieren. Darauf beruht die Allgemeinheit der STL-Algorithmen.

### 14.1.1 Die Deklaration von Funktions-Templates mit Typ-Parametern

Eine Template-Deklaration beginnt mit dem Schlüsselwort *template*, auf das in spitzen Klammern Template-Parameter und eine Deklaration folgen. Falls die Deklaration eine Funktionsdekларation oder -definition ist, ist das Template ein **Funktions-Template**. Der Name der Funktion ist dann der **Name** des Templates.

*template-head:*

*template < template-parameter-list > requires-clause<sub>opt</sub>*

*template-parameter-list:*

*template-parameter*

*template-parameter-list , template-parameter*

*template-parameter:*

*type-parameter*

*parameter-declaration*

*type-parameter:*

*type-parameter-key ...<sub>opt</sub> identifier<sub>opt</sub>*

*type-parameter-key identifier<sub>opt</sub> = type-id*

*type-constraint ...<sub>opt</sub> identifier<sub>opt</sub>*

*type-constraint identifier<sub>opt</sub> = type-id*

*template-head type-parameter-key ...<sub>opt</sub> identifier<sub>opt</sub>*

*template-head type-parameter-key identifier<sub>opt</sub> = id-expression*

*type-parameter-key:*

*class*

*typename*

*type-constraint:*

*nested-name-specifier<sub>opt</sub> concept-name*

*nested-name-specifier<sub>opt</sub> concept-name < template-argument-list<sub>opt</sub> >*

Ein **Typ-Parameter** ist ein **Template-Parameter**, der aus einem der Schlüsselworte *typename* oder *class* und einem Bezeichner besteht. Der Bezeichner kann dann in der Funktions-Dekларation des Templates **wie ein Datentyp** verwendet werden. Dabei sind *typename* und *class* gleichbedeutend. In den Anfangszeiten von C++ war nur *class* zulässig. Seit etlichen Jahren akzeptieren alle Compiler auch *typename*. Da *typename* explizit zum Ausdruck bringt, dass ein Datentyp gemeint ist, der nicht unbedingt eine Klasse sein muss, wird im Folgenden meist *typename* verwendet.

Ab C++20 kann anstelle von *typename* oder *class* auch noch der Name eines concepts angegeben werden (siehe Abschnitt 14.6).

Beispiel: Die folgenden beiden Templates sind semantisch gleichwertig:

```

template <class T>
void vertausche(T& a, T& b)
{
    T h = a;
    a = b;
    b = h;
}

template <typename T>
void vertausche(T& a, T& b)
{
    T h = a;
    a = b;
    b = h;
}

```

Alle Algorithmen der STL (siehe Kapitel 15) sind Funktions-Templates. Dazu gehört auch das Funktions-Template *swap*, das im Wesentlichen wie *vertausche* definiert ist.

Will man bei der Definition eines Funktions-Templates Spezifizierer wie *extern*, *inline* usw. angeben, müssen diese nach „template < ... >“ angegeben werden.

### 14.1.2 Spezialisierungen von Funktions-Templates

Ein Funktions-Template kann wie eine gewöhnliche Funktion aufgerufen werden, die kein Template ist.

Beispiel: Das im letzten Beispiel definierte Funktions-Template *vertausche* kann folgendermaßen aufgerufen werden:

```

int i1 = 1, i2 = 2;
vertausche(i1, i2);
string s1 = "3", s2 = "4";
vertausche(s1, s2);

```

Beim Aufruf eines Funktions-Templates erzeugt der Compiler dann eine Funktionsdefinition, wenn diese nicht schon zuvor erzeugt wurde.

Dazu bestimmt er zuerst den Datentyp der Template-Argumente aus dem Datentyp der Argumente des Funktions-Templates, falls das möglich ist. Man sagt auch, dass er das Typ-Argument aus dem Funktionsargument ableitet. Die weitere Vorgehensweise kann man sich vereinfacht als „**copy and paste**“-Operation vorstellen: Der Compiler kopiert das Template und ersetzt dann den Typ-Parameter durch das Typ-Argument. Die so erzeugte Funktion wird dann in den Quelltext eingefügt. Eine aus einem Funktions-Template erzeugte Funktion wird als **Spezialisierung** des Templates bezeichnet.

Beispiel: Aus dem ersten Aufruf von *vertausche* im letzten Beispiel erzeugt der Compiler die folgende Spezialisierung und ruft diese auf:

```
void vertausche(int& a, int& b)
{
    int h = a;
    a = b;
    b = h;
}
```

Aus dem zweiten Aufruf von *vertausche* wird eine Spezialisierung mit dem Datentyp *string* erzeugt:

```
void vertausche(string& a, string& b)
{
    string h = a;
    a = b;
    b = h;
}
```

Wenn ein Funktions-Template mit Argumenten aufgerufen wird, für die schon eine Spezialisierung erzeugt wurde, wird keine neue erzeugt, sondern die zuvor erzeugte Spezialisierung erneut aufgerufen.

Beispiel: Beim zweiten Aufruf von *vertausche* wird die Spezialisierung aus dem ersten Aufruf aufgerufen:

```
int i1 = 1, i2 = 2;
vertausche(i1, i2);
vertausche(i1, i2); // keine neue Spezialisierung
```

Mit einem generischen Lambda-Ausdruck (siehe Abschnitt 13.5.3) erhält man ein Funktions-Template manchmal etwas einfacher.

Beispiel: Der generische Lambda-Ausdruck

```
auto swap = [](auto& x, auto& y)
{
    auto h = x;
    x = y;
    y = h;
};
```

entspricht im Wesentlichen dem Funktions-Template von oben.

Funktions-Templates unterscheiden sich von Funktionen insbesondere bei der Konversion von Argumenten:

- Ein Parameter einer Funktion hat einen Datentyp, in den ein Argument beim Aufruf der Funktion gegebenenfalls konvertiert wird.
- Ein Template-Parameter hat dagegen keinen Datentyp. Deshalb kann ein Argument beim Aufruf eines Funktions-Templates auch nicht in einen solchen Parametertyp konvertiert werden.

Der Compiler verwendet den Datentyp des Arguments beim Aufruf eines Funktions-Templates meist unverändert in der erzeugten Funktion. Nur für Argumente, deren Datentyp kein Referenztyp ist, werden die folgenden **Konversionen** durchgeführt:

- Ein Arraytyp wird in einen entsprechenden Zeigertyp konvertiert,
- ein Funktionstyp wird in einen entsprechenden Funktionszeigertyp konvertiert,
- *const*- oder *volatile*-Angaben der obersten Ebene werden ignoriert,

Deswegen werden bei Aufrufen eines Funktions-Templates mit verschiedenen Argumenttypen auch verschiedene Spezialisierungen erzeugt. Insbesondere wird ein Argument nicht in den Datentyp des Parameters einer zuvor erzeugten Spezialisierung konvertiert.

Im Zusammenhang mit Templates ist es gelegentlich hilfreich, wenn man sich die Datentypen anzeigen lassen kann, die der Compiler in einer Spezialisierung verwendet. Das ist mit einem Funktions-Template wie

```
template <typename T, typename U>
string Typenames(T x, U y)
{ // gibt die Namen der Typ-Argumente zurück
  return string(typeid(x).name() + "," + typeid(y).name());
}
```

möglich, das die Namen der Typargumente als String zurückgibt. Sie beruht auf der nach

```
#include <typeinfo> // oder import std.core; (siehe Abschnitt 2.13)
```

verfügbaren Elementfunktion

```
const char* name() const;
```

von **typeid**, die zu einem Typbezeichner oder einem Ausdruck den Namen des Datentyps zurückgibt:

```
typeid(T).name(); // T: ein Typbezeichner, z.B. typeid(int)
typeid(x).name(); // x: ein Ausdruck, z.B. typeid(17)
```

Beispiel: Der erste Aufruf zeigt die Konversion eines Array-Arguments in einen Zeiger:

```
int a[10]; int* p;
string s = Typenames(a, p); // int*,int*
```

Die nächsten beiden Aufrufe zeigen, dass für *int* und *char*-Argumente verschiedene Spezialisierungen erzeugt werden, obwohl *char* in *int* konvertiert werden kann:

```
int i; char c;
string s1 = Typenames(i, a); // int,int*
string s2 = Typenames(c, a); // char,int*
```

Der Compiler kann ein Template-Argument auch bei komplexeren Parametern und Argumenten ableiten. Dazu gehören diese und zahlreiche weitere Formen:

`const T`      `T*`      `T&`      `T [integer-constant]`

Beispiel: Mit

```
template <typename T, typename U>
string Typenames2a(vector<T> x, U* y)
{ // returns the template argument typename
  return string(typeid(T).name() + "," + typeid(U).name());
};

vector<int> v; double* p;
```

erhält man den als Kommentar angegebenen String:

```
string s3 = Typenames2a(v, p); // int,double
```

Falls mehrere Parameter eines Funktions-Templates denselben Template-Parameter als Datentyp haben, müssen die beim Aufruf **abgeleiteten Datentypen** ebenfalls **gleich** sein.

Beispiel: Bei dem Funktions-Template

```
template <typename T> void f(T x, T y) { }
```

haben die beiden Funktionsparameter x und y beide den Template-Parameter T als Datentyp. Beim Aufruf

```
f(1.0, 2); // error: template-Parameter "T" ist mehrdeutig
```

dieses Templates leitet der Compiler für das erste Argument den Datentyp *double* und für das zweite *int* ab. Da diese verschieden sind, erzeugt der Compiler eine Fehlermeldung.

Da der Compiler den Datentyp eines Template-Arguments aus dem Datentyp der Funktionsargumente ableitet, kann er **nur** Template-Argumente ableiten, die zu **Parametern** gehören. Aus einem Rückgabetyt können keine Argumente abgeleitet werden.

Beispiel Beim Aufruf des Templates

```
template <typename T> T* New()
{
  return new T;
}
```

erhält man eine Fehlermeldung:

```
int* p = New(); // error: template-Argument für "T" konnte
                nicht hergeleitet werden
```

Die Ableitung der Template-Argumente durch den Compiler ist nur eine von zwei Möglichkeiten, Template-Argumente zu bestimmen. Die andere ist die Angabe von **explizit spezifizierten Template-Argumenten** in spitzen Klammern nach dem Namen des Templates.

Explizit spezifizierte Template-Argumente werden oft für den Rückgabotyp eines Funktions-Templates verwendet, sowie um den Datentyp der Funktionsargumente zu konvertieren.

Beispiel: Durch das explizit spezifizierte Template-Argument *int*

```
int* p = New<int>();
```

erreicht man, dass die Spezialisierung der Funktion *New* mit dem Datentyp *int* erzeugt wird.

Da der Datentyp eines String-Literals im Wesentlichen *const char\** ist, wird aus

```
template <typename T>
T Add(T x, T y)
{
    return x + y;
}
```

durch den Aufruf von

```
string s = Add("a", "b"); // Fehler: Zwei Zeiger können nicht
                           addiert werden
```

eine Funktion erzeugt, in der zwei Zeiger addiert werden. Das ist aber nicht möglich. Diesen Fehler kann man mit einem explizit spezifizierten Template-Argument korrigieren, das die Argumente der Funktion in den Datentyp *string* konvertiert:

```
string s = Add<string>("a", "b"); // das geht
```

Template-Argumente werden nur abgeleitet, wenn sie nicht explizit spezialisiert sind. Gibt man mehrere Template-Argumente explizit an, werden sie den Template-Parametern in der aufgeführten Reihenfolge zugeordnet.

Beispiel: Aus dem Funktions-Template

```
template<typename T, typename U>
void f(T x, T y, U z) { }
```

werden durch die folgenden Aufrufe Spezialisierungen mit den als Kommentar angegebenen Parametertypen erzeugt:

```
f(1, 2, 3.0);           // f(int,int,double);
f<char>(1.0, 2, 3.0);    // f(char,char,double);
f<double, int>(1.0, 2, 3.0); // f(double,double,int);
```

Während der Datentyp von Funktionsargumenten, die denselben Template-Parametertyp haben, bei abgeleiteten Typargumenten gleich sein muss, kann er bei explizit spezifizierten Template-Argumenten auch verschieden sein. Die Funktionsargumente werden dann in den Datentyp des Template-Arguments konvertiert.

Beispiel: Bei dem Funktions-Template `f` aus dem letzten Beispiel haben die ersten beiden Funktionsparameter `a` und `b` beide den Template-Parameter `T` als Datentyp. Beim Aufruf

```
f(1.0, 2, 3.0); // error: template-Parameter "T" ist
                mehrdeutig
```

dieses Templates leitet der Compiler aus dem ersten Argument den Datentyp *double* und beim zweiten *int* ab. Da diese verschieden sind, erzeugt der Compiler eine Fehlermeldung.

Mit explizit spezifizierten Template-Argumenten werden die Funktions-Argumente dagegen in den Typ der Template-Argumente konvertiert. Deshalb ist der folgende Aufruf möglich:

```
f<int>(1.0, 2, 3.0); // f(int,int,double);
```

Damit der Compiler das Template *Max* auch mit Argumenten eines unterschiedlichen Typs aufrufen kann, müssen die die Typ-Parameter verschieden sein:

```
template <typename T1, typename T2>
auto Max(T1 x, T2 y)
{
    if (x>y)
        return x;
    else
        return y;
}
```

Dann kann der Compiler den Rückgabotyp aber nicht selbst herleiten. Da dieses Problem bei Templates öfters vorkommt, gibt es die Möglichkeit, den Rückgabotyp mit einem sogenannten nachstehenden Rückgabotyp (siehe Abschnitt 8.1.11) vorzugeben. Dieser wird nach der Parameterliste und `->` angegeben. Hier kann man das nach

```
#include <type_traits> // mehr über type traits in Abschnitt 14.3
```

verfügbare Template *common\_type* verwenden, das aus zwei oder mehr Typ-Argumenten den gemeinsamen Datentyp konstruiert:

```
template <typename T1, typename T2>
auto meinMax(T1 x, T2 y) -> typename std::common_type<T1,T2>::type
{
```



```

    if (x>y)
        return x;
    else
        return y;
}

```

Damit der **Compiler** aus einem Funktions-Template eine Funktion erzeugen kann, **muss** er **seine Definition kennen**. Deshalb muss jedes Programm, das ein Template verwendet, den Quelltext der Template-Definition enthalten. Es reicht nicht wie bei gewöhnlichen Funktionen aus, dass der Compiler nur eine Deklaration sieht, deren Definition dann zum Programm gelinkt wird. Deswegen

- ist es nicht möglich, einem Kunden eine Bibliothek mit Templates zur Verfügung zu stellen, ohne den Quelltext zur Verfügung zu stellen.
- werden Templates in Header-Dateien (\*.h) und nicht in cpp-Dateien zur Verfügung gestellt.

Jede Spezialisierung eines Funktions-Templates enthält ihre eigenen **statischen lokalen Variablen**.

Beispiel: Mit dem Funktions-Template

```

template <typename T> int f(T j)
{
    static int i = 0;
    return i++;
}

```

erhält man mit den folgenden Funktionsaufrufen die jeweils als Kommentar angegebenen Werte:

```

int i1 = f(1);    // 0
int i2 = f(1);    // 1
int i3 = f(1.0);  // 0

```

Eine aus einem Funktions-Template erzeugte Funktion unterscheidet sich nicht von einer „von Hand“ geschriebenen Funktion. Deshalb sind Funktions-Templates eine einfache Möglichkeit, Funktionen mit identischen Anweisungen zu definieren, die sich nur im Datentyp von Parametern, lokalen Variablen oder dem des Rückgabewertes unterscheiden.

Die nächste Tabelle enthält die Laufzeiten für eine gewöhnliche Funktion und ein Funktions-Template mit denselben Anweisungen. Obwohl man identische Laufzeiten erwarten könnte, trifft das nicht für alle Compiler zu. Die absoluten Laufzeiten in dieser Tabelle sind aber nicht vergleichbar, da sie zum Teil auf verschiedenen Rechnern erstellt wurden:

| Benchmarks Auswahlort, n=40000   | Funktion | Funktions-Template |
|----------------------------------|----------|--------------------|
| Visual Studio 2019, x64, Release | 0,9 Sek. | 0,5 Sek.           |
| Visual Studio 2019, x86, Release | 0,9 Sek. | 0,9 Sek.           |
| Visual Studio 2010, x86, Release | 0,5 Sek. | 0,9 Sek.           |

Ausdrücke mit *static\_cast*, *const\_cast* usw. sind zwar keine Aufrufe von Funktions-Templates. Sie verwenden aber die Syntax explizit spezifizierter Template-Argumente, um den Datentyp des Rückgabewerts der Konversion festzulegen:

```
static_cast<int>(3.5); // Datentyp int
```

### 14.1.3 Fehlersuche bei Template-Instanziierungen

Der Compiler kann die aus einem Funktions-Template erzeugte Funktion nur dann übersetzen, wenn die **Anweisungen der Funktion definiert** sind. Andernfalls erhält man eine Fehlermeldung.

Beispiel: Aus dem Funktions-Template *max*, das in der STL etwa folgendermaßen definiert ist

```
template <typename T>
const T& max(const T& x, const T& y)
{
    return ((x>y) ? x : y);
}
```

wird beim Aufruf mit *int*-Argumenten

```
int m1 = std::max(1, 2);
```

eine Funktion erzeugt, in der die *int*-Argumente mit dem Operator *>* verglichen werden. Da dieser Operator für *int*-Werte definiert ist, kann diese Anweisung kompiliert werden.

Mit Argumenten des Typs

```
struct S { int i; };
```

wird dagegen beim Aufruf von *max*

```
S s1, s2;
S ms = std::max(s1, s2);
```

eine Funktion erzeugt, in der die Argumente des Typs *S* mit dem Operator *>* verglichen werden:

```
const S& max(const S& x, const S& y)
{
    return ((x>y) ? x : y);
}
```

Diese Operation kann nicht übersetzt werden, da der Operator `>` für Operanden des Datentyps `S` nicht definiert ist. Das führt in der Fehlerliste (*Ansicht|Fehlerliste*) zu Fehlermeldungen, die sich auf den Quelltext von `max` beziehen. Ein Doppelklick auf eine dieser Fehlermeldungen führt zum Quelltext in der Datei `xutility`:

| Code                                                                                    | Beschreibung                                                                                                                                                               | Datei  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
|  C2678 | Binärer Operator "<": Es konnte kein Operator gefunden werden, der einen linksseitigen Operanden vom Typ "const S" akzeptiert (oder keine geeignete Konvertierung möglich) | xutili |
|  C2056 | Ungültiger Ausdruck                                                                                                                                                        | xutili |
|  C2088 | "<": Ungültig für struct                                                                                                                                                   | xutili |

Der Quelltext in `xutility` wäre jetzt aber sicher die falsche Stelle, um die Ursache für diesen Fehler zu beheben. Diese Ursache ist nämlich nicht die Definition des Templates, sondern sein Aufruf. Der Hinweis auf `S` in dieser Fehlermeldung zeigt, dass ein Aufruf von `max` mit Argumenten dieses Typs die Ursache ist. Deshalb muss man im Quelltext die Stelle suchen, an der `max` mit Argumenten dieses Typs aufgerufen wird. Diese Suche kann aber immer noch sehr zeitaufwendig und mühsam sein. Glücklicherweise listet Visual Studio alle fehlerhaften Aufrufe von Templates im Ausgabefenster (*Ansicht|Ausgabe*) auf. Dabei werden alle Zwischenschritte der Template-Ersetzung aufgelistet. In Meldungen wie

```
c:\program files (x86)\microsoft visual studio 14.0\vc\
include\algorithm(3609): note: Siehe Verweis auf die
Instanziierung der gerade kompilierten Funktions-
template "const _Ty &std::max<S>(const _Ty &,const _Ty
&) noexcept(<expr>)".
1>         with
1>         [
1>             _Ty=S
1>         ]
```

sieht man auch noch, dass die Funktion `max` die Ursache ist. Manchmal erhält man auch noch eine Fehlermeldung der Art

„Operator `>`: '`S`' definiert diesen Operator ... nicht“

Mit einem Klick auf diese Fehlermeldung springt der Cursor im Editor an die Stelle, an der das Template aufgerufen wurde. Das ist dann meist die Stelle, an der der Fehler im Quelltext behoben werden muss.

Diese Suche nach dem Aufruf eines Templates mit unzulässigen Argumenten im Ausgabefenster kann sehr mühsam werden. Mit Concepts (siehe Abschnitt 14.6) wird das wesentlich einfacher. Die seit Visual Studio 2017 verfügbaren Beispielvorglagenargumente sind aber oft auch schon eine große Hilfe: Klickt man eine Zeile im Template an, wird die Option eingeblendet, Beispielvorglagenargumente anzugeben:

```
template <typename T> <T> Geben Sie Beispielvorgabenargumente für IntelliSense an. ▾
const T& max(const T& x, const T& y)
{
    return ((x > y) ? x : y);
}
```

Hier kann man nach dem Anklicken des Stift-Symbols einen Datentyp angeben

Instanziierungsargumente ✕

Geben Sie ein Beispielargument für jeden Parameter ein.

| Parameter | Argument                                           |
|-----------|----------------------------------------------------|
| max       |                                                    |
| T         | <input style="width: 80%;" type="text" value="S"/> |

Schließen
Auf Standardwerte zurücksetzen

für den das Template dann instanziiert wird und bei einem Fehler auch eine Fehlermeldung angezeigt wird:

```
template <typename T> <T> T=S ▾
const T& max(const T& x, const T& y)
{
    return ((x > y) ? x : y);
}
```

Kein ">"-Operator stimmt mit diesen Operanden überein.  
 Operandentypen sind: const S > const S  
 Während der Instanziierung von ""const T&max(const T &x, const T &y) [mit T=S]" in Zeile 43" ermittelt

Mit der Option „Alle vorhandenen Instanziierungen hinzufügen“ kann man alle Typ-Argumente im Projekt suchen lassen. Diese werden dann bei der Auswahl angeboten, so dass man sie nicht selbst eintippen muss:

```
template <typename T> <T> T=S ▾
const T& max(const T& x, const T& y)
{
    return ((x > y) ? x : y);
}
```

**Recent**

T=S

**Instantiations**

(Keine)

Alle vorhandenen Instanziierungen hinzufügen

#### 14.1.4 Funktions-Templates mit Nicht-Typ-Parametern

Wie die letzte Zeile der Syntaxregel

*template-parameter:*  
*type parameter*  
*parameter declaration*

zeigt, kann ein Template-Parameter nicht nur ein Typ-Parameter sein, sondern auch ein gewöhnlicher Parameter wie bei einer Funktionsdeklaration. Solche Template-Parameter werden auch als **Nicht-Typ-Parameter** bezeichnet und müssen einen der Datentypen aus der Tabelle von Abschnitt 14.2.3 haben. Vorläufig werden nur die folgenden Parameter und Argumente verwendet.

| Datentyp                 | Argument                               |
|--------------------------|----------------------------------------|
| Ganzzahldatentyp         | konstanter Ausdruck eines Ganzzahltyps |
| Zeiger auf eine Funktion | eine Funktion mit externer Bindung     |

Im Template sind **ganzzahlige Nicht-Typ-Parameter** konstante Ausdrücke. Sie können deshalb z.B. zur Definition von Arrays verwendet und nicht verändert werden. In *GetValue* wird beim ersten Aufruf ein Array initialisiert, dessen Elementanzahl über einen Ganzzahlparameter definiert ist. Bei jedem weiteren Aufruf wird dann nur noch der Wert eines Arrayelements zurückgegeben:

```
template<Typename T, int Max>
void NichtTypParam()
{
    T a[Max]; // ein Array
    Max = 17; // Fehler
}
```

Dieses Funktions-Template kann dann folgendermaßen aufgerufen werden:

```
NichtTypParam<int, 100>(); // Max==100
int n = 100;
NichtTypParam<int, n>(); // Fehler
```

Mit einem **Funktionszeiger** kann man einem Funktions-Template eine Funktion als Template-Argument übergeben:

```
const int Max = 100;
template <double(*f)(double)> double sum2()
{
    double s = 0;
    for (int i = 0; i<Max; i++) s = s + f(i);
    return s; // s=f(0)+f(1)+...+f(Max-1)
};
```

Dieses Funktions-Template kann man z.B. mit

```
inline double g(double x)
{
    return x;
}
```

aufrufen wie in

```
double s2 = sum2<g>();
```

Wenn man ein Funktions-Template mit einem Funktionszeiger aufrufen will, muss man den Template-Parameter aber nicht als Funktionszeiger angeben. Da der Compiler den Typ des Template-Parameters aus dem Template-Argument ableitet, ist *sum3* gleichwertig zu *sum2*:

```
template <typename Function> double sum3(Function f)
{
    double s = 0;
    for (int i = 0; i<Max; i++) s = s + f(i);
    return s; // s=f(0)+f(1)+...+f(Max-1)
};
```

Auf diese Weise ist nicht nur die Definition einfacher, sondern auch der Aufruf:

```
double s3 = sum3(g);
```

Bei älteren Compilern war der Aufruf von *sum2* oder *sum3* manchmal schneller als der Aufruf von *sum1*, der man die Funktion als Funktionszeiger übergibt:

```
double sum1(double(*f)(double x))
{
    double s = 0;
    for (int i = 0; i<Max; i++) s = s + f(i);
    return s; // s=f(0)+f(1)+...+f(Max-1)
}
```

Dieser Geschwindigkeitsvorteil ergab sich daraus, dass der Funktionsaufruf im Template *inline* expandiert wurde, was beim Aufruf über einen Funktionszeiger nicht möglich war. Ohne eine *inline*-Expansion war der Unterschied gering. Bei modernen Compilern konnte aber kein Unterschied mehr festgestellt werden.

Template-Parameter, für die man wie in *sum3* Funktionen einsetzen kann, werden von **vielen STL Algorithmen** verwendet.

### 14.1.5 Explizit instanziierte Funktions-Templates Θ

Durch eine **explizite Instanziierung** eines Funktions-Templates wird aus dem Template eine Funktion erzeugt, auch ohne dass man das Template aufruft.

*explicit-instantiation:*  
template declaration

Dazu gibt man nach dem Wort *template* als *declaration* eine Spezialisierung eines zuvor definierten Funktions-Templates an. Eine explizite Instanziierung muss global oder in einem Namensbereich erfolgen. Sie darf nicht lokal oder in einer Klasse sein.

Beispiel: Mit den Definitionen

```
struct C {};  
  
template <typename T> T Add(T x, T y)  
{  
    return x + y;  
};
```

führt die explizite Instanziierung

```
template C Add(C, C);
```

zu einer Fehlermeldung, falls für C der Operator + nicht definiert ist.

**Normalerweise** besteht **keine Notwendigkeit** für eine explizite Instanziierung, da die Funktion vom Compiler bei Bedarf automatisch erzeugt wird. Mit einer expliziten Instanziierung kann man aber auch ohne den Aufruf einer Funktion

- überprüfen**, ob ihre Anweisungen für die angegebenen Typ-Argumente übersetzt werden können, sowie
- erreichen, dass die erzeugte Funktion in eine **Object-Datei** aufgenommen wird. Wenn ein Funktions-Template nur definiert, aber nicht aufgerufen wird, erzeugt der Compiler keine Funktion aus dem Template und kann dann auch keine Funktion in die Object-Datei aufnehmen.

#### 14.1.6 Explizit spezialisierte und überladene Templates

Mit den bisher vorgestellten Möglichkeiten werden alle Spezialisierungen eines Templates aus einer einzigen Template-Definition erzeugt. Deshalb bestehen alle diese Spezialisierungen aus denselben Anweisungen und unterscheiden sich nur in ihren Datentypen. Das ist aber oft unzureichend, da man für verschiedene Datentypen oft auch verschiedene Funktionen benötigt. Solche unterschiedlichen Varianten von Templates sind mit explizit spezialisierten und überladenen Templates möglich.

Eine **explizite Spezialisierung** ist ein Template, das der Compiler für spezielle Template-Argumente verwendet. Sie beginnt mit dem Schlüsselwort *template* und einem leeren Paar von spitzen Klammern. Die darauffolgende *declaration* muss ein Template deklarieren, dessen Name der eines bereits zuvor deklarierten Templates ist. Nach dem Namen können in spitzen Klammern die Template-Argumente angegeben werden, für die die Spezialisierung verwendet werden soll. Falls die Template-Argumente aus den Argumenten beim Aufruf eines Funktions-Templates abgeleitet werden können, kann man sie auch weglassen.

*explicit-specialization:*

```
template < > declaration
```

Beispiel: Für das Template

```
template <typename T> bool kleiner(T x, T y)  
{  
    return x<y;  
}
```

ist

```
template<> bool kleiner<char*>(const char* x, const char* y)
{
    return strcmp(x, y)<0;
}
```

eine explizite Spezialisierung für das Typ-Argument *const char\**. Da der Compiler diesen Datentyp auch aus dem der Argumente beim Aufruf ableiten kann, ist *<const char\*>* hier nicht notwendig:

```
template<> bool kleiner(const char* x, const char* y)
{
    return strcmp(x, y)<0;
}
```

Ruft man dann das Template mit den Argumenten der Spezialisierung auf, wird die explizite Spezialisierung verwendet.

```
kleiner("ab", "cd");//abgeleitetes Argument: const char*
```

Explizite Spezialisierungen sind auch bei Nicht-Typ-Parametern möglich. Sie sind die Grundlage für rekursive Funktions-Templates (siehe Abschnitt 14.1.7).

Beispiel: Mit

```
template<int n> int f(int x) { return f<n-1>(0)+1; }
template<> int f<0>(int x) { return 0; }
```

wird für das Argument 0 die explizite Spezialisierung verwendet:

```
int x = f<3>(0); // x==3
int y = f<0>(0); // y==0
```

Da die Template-Argumente bei einer expliziten Spezialisierung vollständig festgelegt sind, bezeichnet man eine explizite Spezialisierung auch als **vollständige Spezialisierung**.

Ebenso wie Funktionen können auch **Funktions-Templates überladen** werden.

Die Standardbibliothek enthält zahlreiche überladene Funktions-Templates, wie z.B. Überladungen von *swap* für alle STL-Container, Strings und zahlreiche weitere Klassen der STL.

Beispiel: Die Überladung von *swap* für Vektoren ist etwa so definiert und ruft die Elementfunktion *swap* auf:



```

template <class T >
void swap(vector<T>& x, vector<T>& y)
    noexcept(noexcept(x.swap(y)))
{
    x.swap(y)
};

```

Falls mehrere Funktions-Templates und „gewöhnliche“ Funktionen aufgrund ihrer Parameter usw. für einen Funktionsaufruf in Frage kommen, wird zunächst von jedem Funktions-Template eine Spezialisierung erzeugt. Dabei werden die Template-Argumente aus den Funktionsargumenten abgeleitet. Alle so erzeugten Spezialisierungen sind dann zusammen mit den gewöhnlichen Funktionen Kandidaten für den Aufruf.

Aus diesen Kandidaten wird dann die am besten passende Funktion nach dem unter 1. bis 4. beschriebenen Verfahren ausgewählt. Dieses Verfahren wird am Beispiel der überladenen Funktionen *kleiner* illustriert:

```

template <typename T> bool kleiner(T x, T y) // 1
{
    return x<y;
}

template <typename T> bool kleiner(T* x, T* y) // 2
{
    // überladenes Funktions-Template
    return *x<*y;
}

template <> bool kleiner(const char* x, const char* y) // 3
{
    // explizite Spezialisierung von 2
    return strcmp(x, y)<0;
}

bool kleiner(const char* x, const char* y) // 4
{
    // gewöhnliche Funktion
    return strcmp(x, y)<0;
}

```

1. Falls eine „gewöhnliche“ Funktion existiert, die zu den Argumenten passt, wird die „gewöhnliche“ Funktion aufgerufen.

Beispiel: Mit den vier Definitionen von oben wird beim Aufruf

```
kleiner("aa", "bb");// 4, kleiner(const char*,const char*)
```

die Funktion (4) und keine der Spezialisierungen des Funktions-Templates aufgerufen. Die überladenen und spezialisierten Templates werden bei der Auswahl nicht berücksichtigt.

Für Typ-Parameter eines Funktions-Templates kann man sowohl mit einer expliziten Spezialisierung als auch mit einer gewöhnlichen Funktion erreichen, dass für spezielle

Argumente eine bestimmte Funktion aufgerufen wird. Wir werden aber unter 3. sehen, dass das mit gewöhnlichen Funktionen am besten erreicht wird.

Für Nicht-Typ-Parameter besteht diese Möglichkeit aber nur mit einer expliziten Spezialisierung.

2. Falls keine gewöhnliche Funktion passt, wird von allen überladenen Templates das am meisten spezialisierte ausgewählt. Dabei ist ein erstes Template **mehr spezialisiert** als ein zweites, wenn das zweite mit allen Datentypen aufgerufen werden kann, mit denen man auch das erste aufrufen kann, aber nicht umgekehrt.

Explizite Spezialisierungen werden erst in einem zweiten Schritt berücksichtigt, nachdem eines der überladenen Templates ausgewählt wurde: Falls das ausgewählte Template eine zu den Argumenten passende explizite Spezialisierung hat, wird diese explizite Spezialisierung aufgerufen.

Beispiel: Durch den nächsten Aufruf wird das Funktions-Template (2) aufgerufen, da es am meisten spezialisiert ist:

```
int *x, *y;  
kleiner(x, y); // kleiner<int*>(x,y)
```

3. Bei der Entscheidung, zu welchem Funktions-Template eine explizite Spezialisierung gehört, werden nur die im Quelltext davor definierten Funktions-Templates berücksichtigt.

Beispiel: Entfernt man von den Funktionsdefinitionen oben die letzte (4), dann wird durch den nächsten Aufruf die Spezialisierung (3) aufgerufen, da sie das am besten passende überladene Funktions-Template spezialisiert:

```
kleiner("aa", "bb"); // kleiner<char*>(x,y)
```

Vertauscht man dagegen die Reihenfolge der Funktionen (2) und (3), ist (3) eine explizite Spezialisierung von (1) und nicht mehr eine von (2). Deswegen wird dann durch den letzten Aufruf das überladene Template (2) aufgerufen und nicht mehr (3). Da das etwas verwirrend werden kann, empfiehlt sich eine gewöhnliche Funktion anstelle einer expliziten Spezialisierung.

4. Falls die ersten beiden Schritte zu keiner oder mehr als einer passenden Funktion führen, hat das eine Fehlermeldung des Compilers zur Folge.

Offensichtlich sind die Regeln 2. und 3. verwirrend, da die Reihenfolge im Quelltext einen Einfluss darauf haben kann, welche Funktion ausgewählt wird. Deswegen sollte man Funktionen, die für einen ganz bestimmten Datentyp ausgewählt werden sollen, **immer als gewöhnliche Funktionen** und nicht als explizite Spezialisierungen definieren.

Diese Beispiele zeigen, wie man erreichen kann, dass für spezielle Template-Argumente auch spezielle Funktionen aufgerufen werden. Wäre nur die erste Version der Funktion *kleiner* definiert, würden in der Funktion *Minimum* bei Arrays mit Zeigern die Zeiger (mit den Adressen) verglichen und nicht die Werte, auf die sie zeigen.

Im Funktions-Template *Minimum* werden so in Abhängigkeit vom Datentyp der Arrayelemente immer die entsprechenden überladenen Versionen von *kleiner* aufgerufen.

```
template <typename T> T Minimum(T A[], int n)
{ // gibt das kleinste Element von A[0].. A[n-1] zurück
  int iMin = 0;
  for (int j = iMin + 1; j<n; j++)
    if (kleiner(A[j], A[iMin])) iMin = j;
  return A[iMin];
}
```

Für ein Array mit Werten erhält man so den minimalen Wert. Mit einem Array mit Zeigern erhält man den minimalen dereferenzierten Wert und mit einem Array von Zeigern auf *char* den bezüglich *strcmp* minimalen Wert:

```
int a[5] = { 5,4,6,2,1 };
int x = Minimum(a, 5); // x=1
int* p[5] = { new int(5),new int(4),new int(6),new int(2) };
int* y = Minimum(p, 4); // *y=2
char* n[5] = { "15", "14", "16", "02", "01" };
char* z = Minimum(n, 5); // z="01"
```

### 14.1.7 Rekursive Funktions-Templates Θ

Mit ganzzahligen Nicht-Typ-Parametern können rekursive Funktions-Templates definiert werden. Diese Technik soll hier nur an einem einfachen Beispiel vorgestellt werden.

In dem Funktions-Template *Sum*<*n*> wird *Sum*<*n-1*> aufgerufen:

```
template<int n>
inline double Sum(double(*f)(double))
{
  return f(n) + Sum<n - 1>(f);
};
```

Die rekursiven Aufrufe können mit einer expliziten Spezialisierung beendet werden:

```
template<>
inline double Sum<0>(double(*f)(double))
{
  return f(0);
};
```

Dieses Template kann man dann mit einer Funktion wie

```
inline double g(double x)
{
  return x;
}
```

und einer Konstanten als Argument für *n* aufrufen:

```
const int Max = 3;
double y = Sum<Max>(g); // y=g(3)+g(2)+g(1)+g(0);
```

Dieser Aufruf des Funktions-Templates *Sum* führt dann bereits bei der Kompilation zur rekursiven Berechnung des als Kommentar angegebenen Ausdrucks. Während der Laufzeit dauert diese Zuweisung nicht länger als die Zuweisung einer Konstanten. Dabei darf der Wert für *Max* aber nicht allzu groß sein: Für größere Werte als ca. 500 wird dieser Ausdruck für die meisten Compiler zu komplex.

Solche rekursiven Templates kann man als **Code-Generatoren** verwenden, die bereits **bei der Kompilation Ausdrücke berechnen**, die gewöhnlich nur während der Laufzeit eines Programms berechnet werden. Diese Technik wird auch als **Template-Metaprogrammierung** bezeichnet. Sie wurde bis vor einigen Jahren zur Laufzeitoptimierung verwendet:

- Veldhuizen verwendet solche Templates für Berechnungen, bei denen es auf höchste Geschwindigkeit ankommt und nicht auf die Dauer einer Kompilation.
- Die Boost Metaprogramming Library MPL ist eine Bibliothek mit Algorithmen, Sequenzen und Funktionen, die während der Kompilation ausgewertet werden.

In C++11 kann man aber mit *constexpr*-Funktionen Ergebnisse oft einfacher vom Compiler berechnen lassen (siehe Abschnitt 2.7.3).

## Aufgabe 14.1

1. Überarbeiten Sie die Funktion *AuswahlSort*

```
void AuswahlSort(int A[], int n)
{
    for (int i = 0; i < n - 1; i++)
    {
        int iMin = i;
        for (int j = iMin + 1; j < n; j++)
            if (kleiner(A[j], A[iMin])) iMin = j;
        vertausche(A[iMin], A[i]);
    }
}
```

zu einem Funktions-Template, mit dem man Arrays beliebiger Elementtypen sortieren kann, wenn für die Elemente der Operator *<* und die Funktions-Templates *kleiner* wie in Abschnitt 14.1.6 definiert sind. Die Funktion *kleiner* ist hier deswegen notwendig, weil der Operator *<* für die fundamentalen Datentypen nicht überladen werden kann.

Testen Sie Ihr Funktions-Template mit Arrays der Typen *int*, *int\** und *char\**.

2. Die Funktions-Templates *max* und *for\_each* sind in der STL etwa folgendermaßen definiert:

```

template <class T>
T max(const T& a, const T& b)
{
    return a < b ? b : a;
}

template <class InputIterator, class Function>
Function for_each(InputIterator first,
                 InputIterator last, Function f)
{
    while (first != last) f(*first++);
    return f;
}

```

Außerdem soll die Funktion *print* und die Klasse *Print* definiert sein:

```

void print(int x)
{
    // ...
}

struct Print {
    int operator()(int x) {};
    // ...
};

```

Geben Sie für die Aufrufe unter a) bis f), die der Compiler übersetzen kann, die Funktionen an, die er dabei erzeugt. Begründen Sie für jeden Aufruf, der nicht übersetzt werden kann, wieso das nicht geht, und mit welchen Änderungen im Programm das doch noch möglich wäre.

- a) `max(2, 3);`
- b) `max(4.4, 5.5);`
- c) `max(6, 7.8);`
- d) `int a[10];`  
`for_each(a, a + 10, print);`
- e) `vector<int> v;`  
`for_each(v.begin(), v.end(), print);`
- f) `vector<int> w;`  
`for_each(w.begin(), w.end(), Print());`

3. Definieren Sie globale Operatorfunktionen als Funktions-Templates, die

- a) den Operator „!“ auf den Operator „==“ zurückführen und
- b) die Operatoren „<=“, „>“ und „>=“ auf den Operator „<“ zurückführen.

4. Schreiben Sie ein variadisches Template *Max*, mit dem man das Maximum einer beliebigen Anzahl von Argumenten bestimmen kann. Die Datentypen der Argumente sollen verschieden sein können, müssen aber nicht alle erdenklichen Kombinationen ermöglichen.

## 14.2 Generische Klassen: Klassen-Templates

Wenn man eine Klasse für einen Stack definieren will, der *int*-Werte verwaltet, dann hat diese Klasse dieselben Elemente wie eine Klasse für einen Stack mit *double*-Werten. Die Elemente der beiden Klassen unterscheiden sich lediglich durch ihren Datentyp.

```
class MeinStack
{
    typedef int T; // Datentyp der Elemente
    int SPtr; // Index des "obersten" Elements
    T* Array; // Zeiger auf das erste Element
    int Max; // Anzahl der reservierten Arrayelemente
public:
    MeinStack(int s) :SPtr(-1), Max(s) { Array = new T[s]; }
    virtual ~MeinStack() { delete[] Array; }
    void push(T a) { Array[++SPtr] = a; }
    T pop() { return Array[SPtr--]; }
    bool full() { return SPtr >= Max; }
    bool empty() { return SPtr<0; }
};
```

Mit einem Klassen-Template kann man sich nun die Arbeit ersparen, zwei Klassen zu definieren, die sich lediglich im Datentyp der Elemente unterscheiden, da man dem Template den Datentyp der Elemente als Parameter übergeben kann. Bei der Verwendung des Klassen-Templates gibt man dann einen Datentyp als Argument für den Parameter an. Der Compiler erzeugt dann aus dem Klassen-Template eine Klasse mit dem Datentyp des Arguments anstelle des entsprechenden Parameters.

Anstelle von generischen Datentypen spricht man auch von parametrisierten Datentypen, Schablonen oder Klassenvorlagen.

### 14.2.1 Die Deklaration von Klassen-Templates mit Typ-Parametern

Eine Template-Deklaration beginnt mit dem Schlüsselwort *template*, auf das in spitzen Klammern Template-Parameter und eine Deklaration folgen:

```
templatedeclaration:
template < templateparameterlist > declaration
```

Falls diese Deklaration eine Klassendeklaration oder -definition ist, ist das Template ein **Klassen-Template**. Der Name der Klasse ist dann der **Name** des Klassen-Templates. Die Parameterliste eines Klassen-Templates wird im Wesentlichen genau so wie bei einem Funktions-Template gebildet. Ein Typ-Parameter kann dann in der Template-Definition wie ein Datentyp verwendet werden.

Beispiel: Das Klassen-Template T hat zwei Typ-Parameter T1 und T2, die als Datentypen für die Parameter der Elementfunktion f sowie für zwei Datenelemente verwendet werden:

```
template <typename T1, typename T2> class T {
public:
    T1 x;
    T2* py;
    int f(T1 x, T2 y) { return x + y; }
};
```

### 14.2.2 Spezialisierungen von Klassen-Templates

Nach dem Namen eines Klassen-Templates kann man wie in der Syntaxregel für eine *simple-template-id* in spitzen Klammern Template-Argumente angeben. Für einen Typ-Parameter muss das Argument ein Datentyp sein.

*simple-template-id* :

*template-name* < *template-argument-list*<sub>opt</sub> >

Hier steht *template-name* für den Namen des Templates und *template-argument-list* für eine Folge von Template-Argumenten. In diesem Abschnitt werden nur Datentypen als Template-Argumente verwendet:

*template-name* :

*identifizier*

*template-argument* :

*constant-expression*

*type-id*

*id-expression*

Eine solche *simple-template-id* kann man als Name einer Klasse verwenden. Diese wird dann auch als **Spezialisierung** des Templates bezeichnet:

*class-name* :

*identifizier*

*simple-template-id*

Beispiel: Mit den Klassen-Templates aus dem letzten Beispiel kann man die folgenden Spezialisierungen bilden:

```
T<int, int>
T<int, double>
T<C, D> // C und D sollen hier Klassen sein
```

Da eine Template-Spezialisierung eine Klasse und damit ein Datentyp ist, kann man sie wie einen Datentyp zur Definition von Objekten verwenden. Der Compiler erzeugt aus der Spezialisierung eines Klassen-Templates z.B. dann eine Klasse, wenn die Spezialisierung zur Definition eines Objekts verwendet wird und nicht schon zuvor erzeugt wurde. Für die Template-Parameter werden dabei die Template-Argumente eingesetzt. Er erzeugt für die Klasse außerdem alle Elemente, die verwendet werden. Eine Elementfunktion wird z.B. durch einen Aufruf verwendet.

Beispiele:

1. Aus dem Klassen-Template *T* des Beispiels von oben erzeugt der Compiler mit der Definition

```
T<int, int> t;
```

die folgende Klasse sowie ein Objekt *t* dieser Klasse, falls alle Elemente verwendet werden:

```
class T {
public:
    int x;
    int* py;
    int f(int x, int y) { return x + y; }
};
```

Aus der Definition

```
T<int, double> u;
```

erzeugt er die folgende Klasse sowie ein Objekt *u* dieser Klasse:

```
class T {
public:
    int x;
    double* py;
    int f(int x, double y) { return x + y; }
};
```

Falls die Elementfunktion *f* nicht aufgerufen wird, erzeugt der Compiler sie auch nicht. Da zur Definition der Objekte *t* und *u* ein Standardkonstruktor notwendig ist, wird dieser für beide Spezialisierungen erzeugt.

2. Aus dem Klassen-Template *MeinStack*

```
template <class T> class MeinStack {
    int SPtr; // Index des "obersten" Elements
    T* Array; // Zeiger auf das erste Element
    int Max; // Anzahl der reservierten Arrayelemente
public:
    MeinStack(int s) :SPtr(-1), Max(s) { Array = new T[s]; }
    virtual ~MeinStack() { delete[] Array; }
    void push(T a) { Array[++SPtr] = a; }
    T pop() { return Array[SPtr--]; }
    bool full() { return SPtr >= Max; }
    bool empty() { return SPtr < 0; }
};
```

erzeugt der Compiler in der Funktion *test* eine Klasse, die anstelle des Typ-Parameters *T* das Argument *int* enthält, sowie ein Objekt dieser Klasse:



```

MeinStack<int> si(10);
for (int i = 1; i < 10; ++i) si.push(i);
while (!si.empty())
    cout << si.pop() << endl;

```

Hier werden der Kopierkonstruktor und die Funktion *full* nicht aufgerufen. Deswegen werden diese auch nicht erzeugt.

3. Die STL **Container-Klassen** *vector*, *list*, *map*, *set* usw. sind als Klassen-Templates definiert. Die Typ-Argumente bei ihrer Definition sind die Datentypen der Elemente, die in ihnen abgelegt werden können. Diese Klassen haben viele Elementfunktionen, die aber meist nicht alle benötigt werden. Da die nicht verwendeten Funktionen nicht erzeugt werden, führt die üppige Ausstattung dieser Klassen weder zu einem unnötigen Zeitaufwand beim Kompilieren noch zu einem unnötigen Platzbedarf für das ausführbare Programm.
4. Die STL verwendet das Klassen-Template *pair* um Paare von Werten darzustellen. Solche Paare werden z.B. in den assoziativen Containern *map*, *multimap* usw. verwendet:

```

template <class T1, class T2> // vereinfacht, in <utility>
struct pair {
    T1 first;
    T2 second;
    constexpr pair() {};
    constexpr pair(const T1& x, const T2& y):first(x), second(y) {};
    template<class U, class V>pair(const pair< U, V> & p)
        : first(p.first), second(p.second) { }
};

```

Hier ist der letzte Konstruktor der Kopierkonstruktor. Wäre er nicht mit den Template-Parametern U und V definiert, könnte ein *pair* nur mit einem *pair* mit denselben Template-Argumenten initialisiert werden.

```

pair<int, int> p1;
pair<int, int> p2 = p1;
pair<int, double> p3 = p1; // Error: Cannot convert
                          // 'pair<int,int>' to 'pair<int,double>'

```

Für Paare sind die Operatoren == und < als Funktions-Templates definiert:

```

template <class T1, class T2>
constexpr bool operator==(const pair<T1, T2>& x,
    const pair<T1, T2>& y)
{
    return x.first == y.first && x.second == y.second;
}

```

```
template <class T1, class T2>
constexpr bool operator<(const pair<T1, T2>& x,
    const pair<T1, T2>& y)
{
    return x.first < y.first ||
        (!(y.first < x.first) && x.second < y.second);
}
```

Da *pair* ein Klassen-Template ist, müssen die Datentypen der Template-Argumente immer explizit angegeben werden:

```
std::map<string, string> m;
m.insert(std::pair<string, string>("Daniel", "13.11.79"));
```

Diese umständliche Schreibweise kann man mit dem Funktions-Template *make\_pair* vereinfachen. Da es ein Funktions-Template ist, werden die Datentypen der Template-Argumente aus den Datentypen der Funktionsargumente abgeleitet. Es erzeugt ein *pair* aus seinen Argumenten und ist im Wesentlichen so definiert:

```
template <class T1, class T2>
constexpr std::pair<T1, T2> make_pair(const T1& x, const T2& y)
{
    return pair<T1, T2>(x, y);
}
```

Damit wird die *insert*-Anweisung von oben etwas einfacher:

```
m.insert(make_pair("Daniel", "13.11.79"));
```

- Ein String stellt eine Folge von Zeichen dar. Diese Zeichen können z.B. den Datentyp *char* oder *wchar\_t* haben. Da der interne Aufbau eines Strings und seine Operationen vom Datentyp der Zeichen unabhängig sind, liegt es nahe, die Stringklasse als Klassen-Template zu definieren. Der C++-Standard verwendet dazu das Klassen-Template *basic\_string* und definiert dann die Datentypen *string* und *wstring* mit diesem Template:

```
using string = basic_string<char>;
// wie typedef basic_string<char> string;
using u16string = basic_string<char16_t>;
using u32string = basic_string<char32_t>;
using wstring = basic_string<wchar_t>;
```

Wenn man also im C++-Standard nach einer Beschreibung der Elemente eines Strings sucht, findet man diese in der Klasse *basic\_string*. Der folgende Auszug aus dem C++-Standard ist stark vereinfacht und zeigt den Aufbau dieses Templates:

```
template<class charT, class traits = char_traits<charT>,
    class Allocator = allocator<charT> >
class basic_string { // nur ein Auszug
public:
    // einige typedefs:
    using traits_type = traits; // wie typedef traits traits_type;
```

```

// ...
// einige Konstruktoren:
basic_string() noexcept;
basic_string(const basic_string& str);
explicit basic_string(const Allocator& a = Allocator());
basic_string(const basic_string& str, size_type pos = 0,
              size_type n = npos);
basic_string(const charT* s, size_type n, const);
basic_string(const charT* s);
~basic_string();
// ...
};

```

Hier steht *charT* für den Datentyp der Zeichen. Bei einem *string* ist das der Datentyp *char* und bei einem *wstring* der Datentyp *wchar\_t*. Dieser Template-Parameter wird auch in vielen Elementfunktionen verwendet:

```
size_type find(const charT* s, size_type pos = 0) const;
```

Für die Default-Argumente von *basic\_string* wird normalerweise kein Argument übergeben. Ein *string* bzw. ein *wstring* verwendet deshalb

```

char_traits<char> und allocator<char> bzw.
char_traits<wchar_t> und allocator<wchar_t>

```

Das Klassen-Template *char\_traits* enthält Datentypen und Funktionen, auf denen die Implementation von *basic\_string* beruht. Es ist allerdings nur für die Datentypen *char*, *wchar\_t*, *char16\_t* und *char32\_t* definiert (siehe Abschnitt 14.2.5). Da es für andere Datentypen nicht definiert ist, kann man für andere Datentypen auch keine Klassen aus einem *basic\_string* erzeugen. Die folgende Definition wird deshalb nicht übersetzt, außer man definiert die Klasse *char\_traits* für den Datentyp *int*:

```
basic_string<int> is; // Fehler ohne char_traits<int>
```

Das Klassen-Template *allocator* fasst Datentypen und Funktionen zur Speicherverwaltung zusammen.

Da ein Konstruktor eines Klassen-Templates oft nicht alle Typ-Parameter des Templates als Parameter hat, können die Template-Argumente in einem solchen Fall nicht aus den Argumenten eines Konstruktors abgeleitet werden. Vor C++17 musste man die **Template-Argumente** bei der Spezialisierung eines Klassen-Templates (im Unterschied zu einem Funktions-Template) **immer explizit angeben**.

Seit C++17 kann der Compiler die Typ-Argumente aus den Datentypen der Argumente eines Konstruktors ableiten, wenn die Parameterliste des Konstruktors alle Typ-Parameter des Templates enthält. Dazu können weitere Ableitungsregeln (type deduction guideline) kommen (siehe Abschnitt 14.2.7), die die Angabe der Typ-Argumente entbehrlich machen.

Beispiel: Da der Konstruktor von

```
template <typename T1, typename T2>
class T {
    T1 x;
    T2* py;
public:
    T(T1 x, T2 y) { }
};
```

alle Typ-Parameter des Templates enthält, müssen bei einer Spezialisierung keine Typ-Argumente angegeben werden:

```
T t1{ 1, 2 };
```

Mit einem Konstruktor, der wie

```
T(T1 x) { }
```

nicht alle Typ-Parameter als Parameter enthält, ist das nicht möglich:

```
T t2{ 1 }; // Fehler
```

Bei der Klasse

```
template <typename T>
struct vector {
    vector(std::initializer_list<T> a);
};
```

kann der Compiler das Typ-Argument aus dem Datentyp der Elemente einer Initialisierungsliste ableiten:

```
vector v1{ 1, 2, 3 };
```

Damit der **Compiler** aus einem Klassen-Template eine Klasse erzeugen kann, **muss** er **seine Definition kennen**. Deshalb muss jedes Programm, das ein Template verwendet, den Quelltext der Template-Definition enthalten. Da die Container-Klassen und Algorithmen der **STL** Templates sind, müssen diese immer im **Quelltext** vorliegen. Es ist insbesondere nicht möglich, eine Template-Bibliothek ohne ihren Quelltext zur Verfügung zu stellen.

Eine aus einem Klassen-Template erzeugte Elementfunktion kann Anweisungen enthalten, die der Compiler nicht übersetzen kann. Aus den Fehlermeldungen des Compilers ist es dann nicht immer offensichtlich, wie man die Ursache des Fehlers findet. Siehe dazu die Ausführungen in Abschnitt 14.1.3.

Bei einem Klassen-Template kann man nach dem Template-Parameter und einem „=“ ein **Default-Template-Argument** angeben. Auf einen Parameter mit einem Default-Argument dürfen keine weiteren Parameter ohne Default-Argumente folgen. Ein Funktions-Template kann im Unterschied zu einem Klassen-Template keine Default-Argumente haben.

Beispiel: Mit dem Template

```
template <typename T1, typename T2 = int>
class T {
    // ...
};
```

sind die folgenden beiden Spezialisierungen gleichwertig:

```
T<double, int> c1;
T<double> c2;
```

In einem Template können nicht nur die Template-Parameter selbst verwendet werden, sondern auch **Namen, die von einem Template-Parameter abhängig sind**. Vor einem solchen Namen muss *typename* angegeben werden, damit er vom Compiler als Name eines Datentyps betrachtet wird. Ohne *typename* wird ein solcher Name nicht als Datentyp betrachtet. Das Schlüsselwort *typename* kann nur in der Definition oder Deklaration eines Templates verwendet werden.

Beispiel: In dem Klassen-Template

```
template <typename T> class C {
    typename T::X i;
};
```

wird `T::X` als Datentyp gekennzeichnet, der im Template-Argumente definiert ist. Dieses Template muss mit einem Template-Argument verwendet werden, das einen Datentyp `X` enthält wie z.B. die Klasse `S`:

```
struct S {
    struct X { int i; };
};
```

Alle Container-Klassen der Standardbibliothek enthalten wie die Klasse *deque* den Namen *value\_type* für den Datentyp der Elemente des Containers:

```
template <class T, class Allocator = allocator<T> >
class deque {
public:
    using value_type = T; // wie typedef T value_type;
    // ...
}
```

Dieser Name wird dann z.B. in der Definition der Container-Adapter *stack* und *queue* verwendet:

```
template <class T, class Container = deque<T> >
class stack {
public:
    using value_type = typename Container::value_type;
    using size_type = typename Container::size_type;
```

```

    using container_type = Container;
protected:
    Container c;
public:
    explicit stack(const Container&);
    bool empty() const { return c.empty(); }
    size_type size() const { return c.size(); }
    value_type& top() { return c.back(); }
    const value_type& top() const { return c.back(); }
    void push(const value_type& x) { c.push_back(x); }
    void pop() { c.pop_back(); }
};

```

Diese Definition ist übrigens die fast vollständige Definition des Klassen-Templates *stack* aus der STL. Auch die Definition des Containeradapters *queue* besteht nur aus wenigen Zeilen und ist weitgehend identisch mit der von *stack*. Sie enthält lediglich anstelle der Funktionen *top* und *pop* die folgenden:

```

value_type& front() { return c.front(); }
const value_type& front() const { return c.front(); }
value_type& back() { return c.back(); }
const value_type& back() const { return c.back(); }
void pop() { c.pop_front(); }

```

Der Name eines Klassen-Templates kann in seiner eigenen Definition bei einer Deklaration verwendet werden und stellt hier den Namen des Templates mit den Template-Parametern dar:

```

template<typename T> struct C {
    C* x; // C bedeutet hier C<T>
};

```

### 14.2.3 Klassen-Templates mit Nicht-Typ-Parametern

Die schon bei Funktions-Templates vorgestellten **Nicht-Typ-Parameter** (siehe Abschnitt 14.1.3) können auch bei Klassen-Templates verwendet werden. Die zulässigen Datentypen sind in der linken Spalte der Tabelle

| Datentyp                                   | Argument                                                           |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Ganzzahldatentyp oder Aufzählungstyp       | konstanter Ausdruck eines Ganzzahl- oder Aufzählungstyps           |
| Zeiger auf ein Objekt oder eine Funktion   | Die Adresse eines Objekts oder einer Funktion mit externer Bindung |
| Referenz auf ein Objekt oder eine Funktion | Ein Objekt oder eine Funktion mit externer Bindung                 |
| Zeiger auf ein Element                     | Zeiger auf ein Element                                             |

angegeben. Als Argument für einen solchen Parameter können dann Ausdrücke wie in der rechten Spalte angegeben werden. Andere Datentypen (insbesondere Gleitkommatentypen oder *void*) sind nicht zulässig.

Beispiele: Mit den Definitionen

```
class C {};  
template <C* pc> class CP {};  
template <int(*f)(int) > class Cf {};  
  
int f(int x) { return x; };  
C c; // lokales c geht nicht, keine externe Bindung
```

können die folgenden Spezialisierungen erzeugt werden:

```
CP<&c> cp;  
Cf<f> cf;
```

Ein ganzzahliger Nicht-Typ-Parameter ist im Template eine Konstante und kann nicht verändert werden. Er kann z.B. wie in *MeinStackA* zur Definition eines Arrays als Elementanzahl dienen. Dieses Template realisiert einen Stack, dem die Anzahl der Elemente als Template-Parameter übergeben wird:

```
template <typename T, int Max> class MeinStackA {  
    int SPtr;        // Index des "obersten" Elements  
    T Array[Max];    // Array mit Max Elementen des Typs T  
public:  
    MeinStackA() :SPtr(-1) { }  
    void push(T a) { Array[++SPtr] = a; }  
    T pop() { return Array[SPtr--]; }  
    bool full() { return SPtr >= Max; }  
    bool empty() { return SPtr<0; }  
};  
  
MeinStackA<int, 10> si; // definiert das Objekt si
```

Die Standardbibliothek verwendet Nicht-Typ-Parameter bei der Klasse *bitset*. Diese Klasse kann eine als Template-Argument übergebene Anzahl von Bits darstellen. Sie ist etwa so definiert und ermöglicht die üblichen Bit-Manipulationen der Digitaltechnik:

```
template<size_t N> class bitset { // nur ein Auszug  
public:  
    // Einige Konstruktoren:  
    bitset();  
    bitset(unsigned long val);  
    // Einige Operationen:  
    bitset<N>& operator&=(const bitset<N>& rhs); // AND  
    // analog bitweises OR mit |, XOR mit ^, NOR mit ~  
    bitset<N> operator<<(size_t pos) const;  
    // Shift, analog >>  
    bitset<N>& set(size_t pos, int val = true);
```

```

    bitset<N>& reset(size_t pos);
    bitset<N>& flip(size_t pos);
    // Zugriff auf Elemente:
    reference operator[](size_t pos); // für b[i];
    bool operator==(const bitset<N>& rhs) const;
    bool test(size_t pos) const;
};

```

Beispiel: Ein *bitset* mit 10 Bits wird folgendermaßen definiert:

```
bitset<10> bits;
```

#### 14.2.4 Explizit instanziierte Klassen-Templates $\Theta$

Da der Compiler nur diejenigen Elementfunktionen eines Klassen-Templates erzeugt, die auch aufgerufen werden, wird ein Syntaxfehler in einer nicht aufgerufenen Funktion eventuell nicht entdeckt, da die Funktion nicht erzeugt wird.

Beispiel: Da die Elementfunktion *f* nach

```

template <typename T > class C {
public:
    int f(T x, int y) { return x + y; }
};

C<char*> c;

```

nicht aufgerufen wird, erkennt der Compiler nicht, dass er den Wert in der *return*-Anweisung der Funktion *f* nicht dem *int*-Funktionswert zuweisen kann.

Das kann dazu führen, dass man munter an einem Template schreibt, aber erst später entdeckt, dass es Fehler enthält. Diesen unangenehmen Effekt kann mit einer **expliziten Instanziierung** vermeiden. Sie bewirkt, dass alle Elemente einer Spezialisierung eines Klassen-Templates erzeugt werden. So werden auch alle Funktionen erzeugt, ohne dass man sie aufruft.

Dazu gibt man nach dem Wort *template* als *declaration* das Wort *class* und einer Spezialisierung des Templates an. Eine explizite Instanziierung muss global oder in einem Namensbereich erfolgen. Sie darf nicht lokal oder in einer Klasse sein.

*explicitinstantiation:*  
*template declaration*

Beispiel: Mit dem Template von oben erzeugt die explizite Instanziierung

```
template class C<char*>;
```

eine Fehlermeldung.



### 14.2.5 Partielle und vollständige Spezialisierungen Θ

Es ist nicht immer sinnvoll, alle Spezialisierungen eines Klassen-Templates nach demselben Schema zu erzeugen. So kann z.B. für ein Typ-Argument, das ein Zeiger ist, eine andere Spezialisierung notwendig oder effizient sein als für eines, das kein Zeiger ist. In Abschnitt 14.1.6 wurde gezeigt, wie man bei Funktions-Templates verschiedene Varianten mit überladenen Funktions-Templates und expliziten Spezialisierungen erzeugen kann.

Klassen und Klassen-Templates können allerdings **nicht überladen** werden, da das eine Ableitung der Template-Argumente aus den Argumenten für den Konstruktor erfordern würde. Als Alternative gibt es für Klassen-Templates sogenannte **partielle Spezialisierungen**. Bei einer partiellen Spezialisierung gibt man ein Muster vor, aus dem dann abgeleitet wird, ob die Template-Argumente dazu passen.

Eine partielle Spezialisierung setzt eine Deklaration eines Klassen-Templates voraus, bei der der Name wie in allen bisherigen Beispielen ein Bezeichner ist. Eine solche Deklaration nennt man auch **primäre** Deklaration. Nach einer primären Deklaration kann man ein Template deklarieren, dessen Name eine *template-id* mit dem Namen eines primären Templates ist:

```
templateid:
    templatename < templateargumentlist >
```

Dann ist das so deklarierte Klassen-Template eine **partielle Spezialisierung**. Eine partielle Spezialisierung unterscheidet sich nur dadurch von einem gewöhnlichen (primären) Template, dass ihr Name kein Bezeichner, sondern eine *template-id* ist.

Bisher wurde eine *template-id* nur zur Definition von Spezialisierungen (siehe Abschnitt 14.2.2) verwendet. Dabei waren die Template-Argumente die Argumente, mit denen die Spezialisierung erzeugt wurde. Bei einer partiellen Spezialisierung beschreiben die Argumente der *template-id* das Muster, nach dem entschieden wird, ob eine Spezialisierung zu einer partiellen Spezialisierung passt. Diese Argumente sind oft Template-Parameter oder davon abgeleitete Typen.

Bei den folgenden Deklarationen ist die erste (#1) eine primäre Deklaration. Die weiteren (#2 bis #5) sind partielle Spezialisierungen:

```
template<class T1, class T2, int I> //#1
struct A { int x; };

template<class T, int I>           //#2
struct A<T, T*, I> { int y; };

template<class T1, class T2, int I> //#3
struct A<T1*, T2, I> {};

template<class T>                 //#4
struct A<int, T*, 5> { int z; };

template<class T1, class T2, int I> //#5
struct A<T1, T2*, I> {};
```

Wenn der Compiler aus einem Template eine Klasse erzeugen will, sucht er anhand der Template-Argumente nach einer passenden partiellen oder primären Spezialisierung:

- Falls er genau eine passende partielle Spezialisierung findet, erzeugt er die Klasse aus dieser Spezialisierung.
- Falls er mehr als eine passende partielle Spezialisierung findet, wählt er von diesen das am meisten spezialisierte Template aus. Dabei ist ein zweites Template **mehr spezialisiert** als ein erstes, wenn jede Liste von Template-Argumenten, die zur ersten Spezialisierung passt, auch zur zweiten passt, aber nicht umgekehrt. Nach diesen Regeln wird auch bei überladenen Funktions-Templates das am meisten spezialisierte ausgewählt (siehe Abschnitt 14.1.6). Falls keine der partiellen Spezialisierungen mehr spezialisiert ist als alle anderen, ist die Verwendung des Templates mehrdeutig.
- Falls er keine passende partielle Spezialisierung findet, nimmt er das primäre Template.

Nach den Definitionen von oben werden für a1, ..., a5 die jeweils angegebenen Templates verwendet:

```
A<int, int, 1>   a1; // #1 T1=int, T2=int, I=1
A<int, int*, 1> a2; // #2 T=int, I 1=1
A<int, char*, 5> a3; // #4 T=char, I=5
A<int, char*, 1> a4; // #5 T1=int, T2=char, I=1
A<int*, int*, 2> a5; // mehrdeutig: #3 und #5 passen
```

Ein partiell spezialisiertes Template ist ein völlig eigenständiges Template, das mit dem primären, nicht spezialisierten Template nur den Namen gemeinsam hat. Es besitzt nur die Elemente, die für die Spezialisierung definiert werden, und übernimmt keine Elemente vom primären Template. Deshalb haben a1, a2 und a4 jeweils genau ein Element:

```
a1.x = 17; a2.y = 18; a3.z = 19;
```

Als zweite Möglichkeit, verschiedene Klassen-Templates mit demselben Namen zu definieren, stehen wie bei Funktions-Templates **explizite** oder **vollständige Spezialisierungen** zur Verfügung. Mit einer solchen Spezialisierung kann man ein Klassen-Template deklarieren, das nur für bestimmte Template-Argumente verwendet wird. Diese können bei Typ-Parametern spezielle Datentypen und bei Nicht-Typ-Parametern spezielle Werte sein.

```
explicit specialization:
template < > declaration
```

Bei einer expliziten Spezialisierung eines Klassen-Templates ist der Name in der *declaration* eine Spezialisierung (*template-id*) eines bereits zuvor deklarierten Templates. In dieser Spezialisierung werden die Datentypen oder Werte als Argumente angegeben, für die die explizite Spezialisierung verwendet werden soll.

Beispiel: Das Template #2 ist eine explizite Spezialisierung von #1:

```
template<typename T> struct C { // #1
    T i;
};
```

```
template<> struct C<int> { // #2
    int x;
};
```

Die folgenden Spezialisierungen werden dann aus den als Kommentar angegebenen Definitionen erzeugt:

```
C<int> i;    // #2
i.x = 1;
C<double> d; // #1
d.i = 2;
```

Wie ein partiell spezialisiertes Template ist auch ein vollständig spezialisiertes ein eigenständiges Template, das mit dem nicht spezialisierten nur den Namen gemeinsam hat.

Die folgenden Beispiele zeigen, wie explizite Spezialisierungen von Klassen-Templates in der **C++-Standardbibliothek** verwendet werden:

1. Die Klasse *numeric\_limits* enthält für die fundamentalen Datentypen Informationen, die für den jeweiligen Compiler charakteristisch sind. Dazu gehören z.B. die maximal und minimal darstellbaren Werte. Diese Klasse steht zur Verfügung nach

```
#include <limits> // oder import std.core; (siehe Abschnitt 2.13)
```

Sie ist im Standard so definiert (nur ein Auszug):

```
template<class T> class numeric_limits {
public:
    static constexpr bool is_specialized = false;
    // ... unwichtige Default-Werte
};
```

Für jeden fundamentalen Datentyp existiert eine explizite Spezialisierung:

```
template<> class numeric_limits<bool>;
template<> class numeric_limits<char>;
// usw. für unsigned char, char16_t, char32_t, wchar_t,
// short, int, long, long long, unsigned short, unsigned int,
// unsigned long, float, double, long double
```

In jeder dieser Spezialisierungen hat das Element *is\_specialized* den Wert *true*. Deswegen kann man mit diesem Element feststellen, ob die aktuell verwendete Klasse eine Spezialisierung ist oder ob sie aus dem nicht spezialisierten Template erzeugt wurde.

Als Beispiel für eine mögliche Spezialisierung findet man im Standard:

```
template<> class numeric_limits<float> { // nur ein Auszug
public:
    static constexpr bool is_specialized = true;
```

```

static constexpr float min() noexcept
{ return 1.17549435E-38F; }
static constexpr float max() noexcept
{ return 3.40282347E+38F; }
static constexpr float lowest() noexcept
{ return -3.40282347E+38F; }

static constexpr int digits = 24;
static constexpr int digits10 = 6;
static constexpr int max_digits10 = 9;

static constexpr int radix = 2;
static constexpr float epsilon() noexcept
{ return 1.19209290E-07F; }

static constexpr int min_exponent = -125;
static constexpr int min_exponent10 = -37;
static constexpr int max_exponent = +128;
static constexpr int max_exponent10 = +38;
};

```

## 2. Für die Klasse *char\_traits*

```
template<class charT> struct char_traits;
```

sind nur diese vier expliziten Spezialisierungen definiert:

```

template<> struct char_traits<char>;
template<> struct char_traits<char16_t>;
template<> struct char_traits<char32_t>;
template<> struct char_traits<wchar_t>;

```

Sie enthalten Datentypen und Funktionen, auf denen die Implementation der Stringklassen und der I/O-Streams beruht.

## 3. Die Klassen *complex<float>*, *complex<double>* und *complex<long double>* sind explizite Spezialisierungen des primären Templates *complex*.

Die Klasse *char\_traits* ist ein Beispiel für die in der Standardbibliothek häufiger verwendeten *traits*-Klassen. Solche Klassen fassen meist eine größere Anzahl Datentypen, Funktionen usw. zusammen, die für einen bestimmten Datentyp charakteristisch sind. Die für einen bestimmten Datentyp charakteristischen Elemente werden dann in einer expliziten Spezialisierung für diesen Datentyp definiert.

Diese Technik soll an einem einfachen Beispiel illustriert werden, das von Veldhuizen (2000) übernommen wurde. Den Mittelwert von *n* Werten eines Arrays kann man mit dem Funktions-Template *Average* berechnen:

```
template<class T>
T Average(const T* data, int numElements)
{
    T sum = 0;
    for (int i = 0; i < numElements; ++i)
        sum += data[i];
    return sum / numElements;
};
```

Allerdings liefert *Average* nur für Arrays mit Gleitkommatypen korrekte Gleitkommaergebnisse. Für Arrayelemente eines Ganzzahltyps ist auch das Ergebnis ganzzahlig. Der naheliegende Ausweg, immer den Datentyp *double* zurückzugeben, schließt Arrays mit komplexen Elementen aus.

Mit der traits-Klasse

```
template<class T> struct float_trait {
    using T_float = T; // wie typedef T T_float;
};
```

und expliziten Spezialisierungen für alle relevanten Datentypen

```
template<> struct float_trait<int> {
    using T_float = double; // wie typedef double T_float;
};

template<> struct float_trait<char> {
    using T_float = double; // wie typedef double T_float;
};
```

kann man einem Datentyp die Elemente der Templates zuordnen:

| <i>T</i>    | <i>struct float_trait&lt;T&gt;</i> |
|-------------|------------------------------------|
| <i>int</i>  | <i>double</i>                      |
| <i>char</i> | <i>double</i>                      |
| <i>T</i>    | <i>T</i>                           |

Damit liefert die folgende Version von *average* ihr Ergebnis immer im richtigen Datentyp:

```
template<class T>
typename float_trait<T>::T_float average(const T* data, int
                                         numElements)
{
    typename float_trait<T>::T_float sum = 0;
    for (int i = 0; i < numElements; ++i)
        sum += data[i];
    return sum / numElements;
}
```

In diesem Beispiel hat die traits-Klasse nur ein Element und kann leicht durch einen Template-Parameter ersetzt werden. Die traits-Klasse *char\_traits* hat aber fast 20 Elemente, die nur mühsam als Parameter übergeben werden können.

Partielle Spezialisierungen sind nur für Klassen, aber nicht Elemente einer Klasse möglich. Explizite Spezialisierungen sind dagegen für die folgenden **Elemente eines Klassen-Templates** möglich:

- statische Elemente
- Elementfunktionen
- Elementklassen
- Klassen-Templates
- Funktions-Templates

Die folgenden Beispiele illustrieren die Syntax anhand des Klassen-Templates C:

```
template <typename T> class C {
public:
    static T x;
    int f();
};
```

1. Wie bei Klassen, die keine Templates sind, wird ein **statisches Element** in einer Klasse nur deklariert und nicht definiert. Die Definition muss außerhalb der Klasse erfolgen. Die folgende Definition definiert das statische Element für alle Template-Argumente:

```
template<typename T> T C<T>::x = 0;
```

Jede Klasse, die aus einem Klassen-Template erzeugt wird, hat ihre eigenen statischen Elemente. Deshalb besitzen im folgenden Beispiel c1 und c3 dasselbe statische Element x, während c2 ein anderes statisches Element enthält:

```
C<int> c1;
C<double> c2;
C<int> c3;
```

Durch die folgenden Definitionen wird das statische Element x der Klasse C für die Template-Argumente *int* und *double* explizit spezialisiert. Eine explizite Spezialisierung eines statischen Elements ist nur dann eine Definition, wenn sie einen Initialisierer enthält:

```
template<typename T> T C<T>::x = 0;
template<> int C<int>::x = 1;
template<> double C<double>::x = 2;
```

Für die folgenden Objekte hat das statische Element die als Kommentar angegebenen Werte

```
C<char> cc;    // cc.x: 0
C<int> ci;     // ci.x: 1
C<double> cd; // cd.x: 2
```

## 2. Die Elementfunktion $f$ der Klasse $C$

```
template<typename T> int C<T>::f() { return 0; }
```

wird durch

```
template<> int C<int>::f() { return 1; }
template<> int C<double>::f() { return 2; }
```

für die Template-Argumente *int* und *double* explizit spezialisiert. Für die Objekte aus 1. erhält man die als Kommentar angegebenen Funktionswerte:

```
int fc = cc.f(); // 0
int fi = ci.f(); // 1
int fd = cd.f(); // 2
```

Die explizite Spezialisierung von Elementen eines Klassen-Templates kann die Definition eines kompletten Klassen-Templates ersparen, wenn einzelne Elemente für spezielle Template-Argumente anders als für andere implementiert werden müssen und alle anderen gleich sind.

### 14.2.6 Vererbung mit Klassen-Templates $\Theta$

Klassen-Templates und gewöhnliche Klassen können Basisklassen von Klassen-Templates und gewöhnliche Klassen sein.

- Mit einem aus einem Nicht-Template abgeleiteten Klassen-Template kann man allen aus dem Template erzeugten Klassen gleiche Elemente zur Verfügung stellen.

Beispiel: Jede aus  $D1$  erzeugte Klasse hat ein *int*-Element *c1*.

```
struct C1 {
    int c1;
};

template <typename T> struct D1 : public C1 {
    T c2;
};
```

Die Boost-Bibliotheken verwenden die Klasse

```
class noncopyable { // from boost\noncopyable.hpp
protected:
    noncopyable() {}
    ~noncopyable() {}
private://emphasize the following members are private
    noncopyable(const noncopyable&);
    const noncopyable& operator=(const noncopyable&);
};
```

als Basisklasse von gewöhnlichen Klassen und Klassen-Templates, wenn für Objekte solcher Klassen verhindert werden soll, dass sie kopiert werden können. In C++11 erreicht man das einfacher mit der Angabe = *delete* beim Zuweisungsoperator.

- Aus einem Klassen-Template kann man eine gewöhnliche Klasse ableiten:

```
template <typename T> struct C2 {
    T c2;
};

struct D2a :public C2<int> {
    int d2a;
};

template <typename T> struct D2b :public C2<T> {
    T d2b;
};
```

- Aus einem Klassen-Template kann man ein Klassen-Template ableiten:

```
template <typename T> struct D3a :public C2<T> {
    T d3a;
};

template <typename T, typename U>
struct D3b :public C2<U> {
    T d3b;
};
```

### 14.2.7 Die Ableitung von Typ-Argumenten bei Klassen-Templates

Vor C++17 musste man die Typ-Argumente bei einem Klassen-Template immer explizit angeben.

Beispiel: Vor C++17 war es nicht möglich, bei der Spezialisierung eines Klassen-Templates die Typ-Argumente auszulassen.

```
template <class T1, class T2>
struct Pair // stark vereinfachte Version von std::pair
{
    Pair(const T1& x1, const T2 & x2) : first{ x }, second{
                                                x2 } {}

    T1 first; // der erste Wert
    T2 second; // der zweite Wert
};

Pair<int, std::string> p1(17, "17"); // C++97
```



Bei Funktions-Templates werden die Typ-Argumente dagegen aus den Datentypen der Funktionsargumente abgeleitet, so dass die Typ-Argumente nicht angegeben werden müssen:

```
template <class T1, class T2>
Pair<T1, T2> make_Pair(T1 x1, T2 x2)
{
    return Pair<T1, T2>(x1, x2);
}

std::string s = "abc";
Pair<int, std::string> p2 = make_Pair(17, s); // C++97
```

Da ein Stringliteral wie "abc" den Datentyp *const char\** und nicht *std::string* hat, ist die nächste Definition ein Fehler:

```
Pair<int, std::string> p3 = make_Pair(17, "abc"); // Fehler,
da "abc" den Datentyp const char* und nicht string hat
```

In C++11 wurden für zahlreiche Klassen-Templates Funktions-Templates definiert, deren Namen mit *make* beginnen, die das Klassen-Template aus den Argumenten des Funktions-Templates erzeugen.

```
std::pair<int, double> p4 = std::make_pair(1, 2.0); // C++11
```

Mit *auto* kann die Schreibarbeit noch etwas verkürzt werden:

```
auto p5 = std::make_pair(1, 2.0); // C++11
```

Dieser Umweg, über Funktions-Templates wie *make\_Pair* den Schreibaufwand für Typ-Argumente einzusparen, ist ab C++17 nicht mehr notwendig, da in C++17 für Typ-Argumente bei Klassen-Templates **Ableitungsregeln** aufgenommen wurden („class template argument deduction guidelines“, CTAD, ab Visual Studio 2019). Wenn mit einer solchen Regel die Typ-Argumente für das Klassen-Template abgeleitet werden können, muss man bei der Definition einer Spezialisierung keine Typ-Argumente angeben.

**Vordefinierte Ableitungsregeln** versuchen, die Typ-Argumente aus den Datentypen der Argumente eines Konstruktors abzuleiten. Das ist dann möglich, wenn ein Konstruktor für jeden Typ-Parameter des Klassen-Templates einen Parameter hat.

Beispiel: Da der Konstruktor von

```
template <class T1, class T2>
struct Pair // stark vereinfachte Version von std::pair
{
    Pair(const T1& x, const T2& y) : first{x}, second{y} {}
    T1 first;
    T2 second;
};
```

zu jedem Typ-Parameter einen Parameter mit diesem Typ hat, kann der Compiler den Datentyp eines jeden Template-Arguments aus dem Datentyp der Konstruktor-Argumente ableiten. Damit ist die folgende Definition möglich:

```
Pair p{ 1, 2.0 }; // C++17: wie Pair<int, double> p{1, 2.0}
```

Wegen diesen vordefinierten Ableitungsregeln kann man seit C++17 für viele Klassen-Templates der Standardbibliothek (*std::vector*, *std::tuple*, *std::pair* usw.) die Typ-Argumente weglassen.

Beispiel: Bei der Definition eines *vector* muss man nicht mehr wie früher das Typ-Argument wie in

```
std::vector<int> v1{ 1, 2, 3 }; // vor C++17
```

angeben:

```
std::vector v2{ 1, 2, 3 }; // ab C++17
```

Falls der Compiler als Datentyp den Namen eines Templates ohne Typ-Argumente findet, sucht er nach einer passenden Ableitungsregel. Falls er eine findet, verwendet er diese, um die Typ-Argumente zu bestimmen. Die Definition von *v2* wird dann vom Compiler in die Definition übersetzt:

```
std::vector<int> v2{ 1, 2, 3 };;
```

Intellisense zeigt den Datentyp eines Typ-Arguments an, wenn man mit der Maus darüber fährt:

```
std::vector v1 { 1, 2, 3 };
std::vector<int, std::allocator<int>> v1
```

Damit der Compiler eine Ableitungsregel verwenden kann, müssen alle Argumente für einen Typ-Parameter denselben Datentyp haben. Mit verschiedenen Datentypen erhält man eine Fehlermeldung:

```
std::vector v3 { 1, 2, 3.14 }; // Fehler: verschiedene Typen
```

Mit den vordefinierten Ableitungsregeln werden die **make-Funktionen** wie *make\_pair* für *pair*, *tuple* usw. überflüssig. Für smart pointer (*unique\_ptr* und *shared\_ptr*) sind allerdings keine Ableitungsregeln definiert. Deswegen sollen die *make-Funktionen* *make\_unique* und *make\_shared* weiterhin verwendet werden.

Die vordefinierten Ableitungsregeln können durch eigene ergänzt werden. Eine **selbstdefinierte Ableitungsregel** definiert ein Muster, das dem Compiler sagt, welche Spezialisierung er verwenden soll, wenn die Konstruktor-Argumente zu diesem Muster passen. Dazu wird eine ähnliche Syntax wie bei einem nachstehenden Rückgabebetyp verwendet: Links von einem *->* steht ein Funktionsprototyp mit dem Namen des Templates, und rechts davon die Spezialisierung, die der Compiler verwenden soll. Eine solche Regel wird in dem Gültigkeitsbereich des Templates angegeben, also z.B. global und nicht etwa innerhalb des Templates.

Beispiel: Mit der Klasse

```
template <typename T>
class MeinContainer // sehr einfach, analog zu einem
{                  // Container der Standardbibliothek
    T* p = new T;
public:
    MeinContainer(T x) {};
    template<typename Iterator>
    MeinContainer(Iterator begin, Iterator end) {}
};
```

und der Ableitungsregel

```
MeinContainer(const char*) -> MeinContainer<std::string>;
```

erhält man mit

```
MeinContainer m("const char*"); // m(std::string)
```

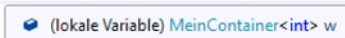
einen Container mit Elementen des Datentyps *std::string*.

Die Container der Standardbibliothek haben fast alle eine Ableitungsregel wie

```
template<class Iterator> // #include <iterator> für
MeinContainer(Iterator b, Iterator e) -> // iterator_traits
    MeinContainer <typename std::iterator_traits<Iterator>
                    ::value_type>;
```

mit der man den Datentyp der Elemente eines Containers aus dem Datentyp der Iteratoren ableiten kann:

```
std::vector<int> v;
MeinContainer w(v.begin(), v.end()); // kein Typ-Argument für w
```

 (lokale Variable) MeinContainer<int> w

Bis zur Einführung von Ableitungsregeln für Klassen-Templates hatten zwei Variable mit demselben Typnamen denselben Datentyp. Seit der Einführung von Ableitungsregeln muss das nicht mehr zutreffen.

Beispiel: Obwohl die Variablen q1 und q2 mit demselben Namen für einen Datentyp definiert sind, sind ihre Datentypen (siehe Kommentar) verschieden:

```
Pair p{ 1, 2 }; // Pair<int,int>
Pair q{ 1.0, 2.0 }; // Pair<double,double>
```

### 14.2.8 Alias Templates Θ

Mit einem Alias Template kann man in einem Klassen-Template einzelne Typ-Parameter spezialisieren und die anderen weiterhin als Parameter lassen. Damit werden in der Standardbibliothek gelegentlich Templates mit vielen Parametern vereinfacht.

Beispiel: Das Alias-Template

```
template<typename T> using int_map = std::map<int, T>;
```

ist ein Template mit einem Typ-Parameter. Das Typ-Argument ist dann das zweite Argument im *map*, dessen erstes Argument immer *int* ist:

```
int_map<std::string> im; // wie map<int, std::string>
```

### Aufgabe 14.2

1. Definieren Sie ein Klassen-Template *Array*, das in Grundzügen wie *std::array* verwendet werden kann. Der Datentyp und die Anzahl der Elemente sollen als Template-Parameter übergeben werden:

```
Array<int, 100> a; // Ein Array a mit 100 int-Elementen
```

Der Zugriff auf ein Element soll wie bei einem C-Array mit dem Indexoperator möglich sein:

```
for (int i = 0; i < a.size(); i++) a[i] = i;
```

Im Gegensatz zu einem C-Array soll eine Exception (z.B. des Typs *std::range\_error*) ausgelöst werden, wenn der Index nicht im Bereich der definierten Elemente liegt.

2. Welche der Aufrufe unter a) bis f) sind mit diesen beiden Templates möglich?

```
template <typename T>
struct Punkt1 {
    T x, y;
    Punkt1(const T& a, const T& b) :x(a), y(b) {}
    Punkt1(const Punkt1& p) :x(p.x), y(p.y) { };
};

template <typename T>
struct Punkt2 {
    T x, y;
    Punkt2(const T& a, const T& b) :x(a), y(b) {}
    template <typename U>
    Punkt2(const Punkt2<U>& p) : x(p.x), y(p.y) { };
};
```

- a) `Punkt1<int> p1a(1, 2);`      d) `Punkt2<int> p2a(1, 2);`  
 b) `Punkt1<int> p1b = p1a;`      e) `Punkt2<int> p2b = p2a;`  
 c) `Punkt1<double> p1c=p1a;`      f) `Punkt2<double> p3b = p2a;`

3. Schreiben Sie ein Klassen-Template *MyVerySimpleSmartPointer*, das einen Zeiger auf einen mit *new* angelegten Speicherbereich enthält und diesen Speicherbereich im Destruktor wieder freigibt.

Der Zeiger soll im Konstruktor initialisiert werden und mit den Operatorfunktionen `*` und `->` den internen Zeiger bzw. den dereferenzierten internen Zeiger zurückgeben. Um die bei der Zuweisung von Zeigern möglichen Probleme zu vermeiden, sollen Zuweisungen von *MyVerySimpleSmartPointer*-Objekten unterbunden werden.

Auf diese Weise wird eine einfache Form von garbage collection erreicht: Für einen solchen smart pointer muss *delete* nicht aufgerufen werden und kann deshalb auch nicht vergessen werden.

4. Die verschiedenen Rückgabetypen der Funktion *Average* von Abschnitt 14.2.5 kann man nicht nur mit einem Template wie *float\_trait* erreichen, sondern auch mit überladenen Funktions-Templates. Implementieren Sie beide Varianten. Welche ist Ihrer Meinung nach einfacher?

## 14.3 Variablen-Templates Θ

Die in C++14 eingeführten Variablen-Templates sind Variablen mit einem Parameter. Dieser Parameter kann ein Typ-Parameter, ein Nicht-Typ-Parameter oder ein Parameter-Paket sein. Eine solche Variable wird instanziiert, wenn eine Spezialisierung der Variablen verwendet wird.

Beispiel: Ein mit einem Typ-Parameter parametrisiertes Variablen-Template wie

```
template<typename T = double> T x;
```

ist für jedes Typ-Argument eine eigene Variable, die man so verwenden kann:

```
x<int> = 5;           // instanziiert eine int-Variable x<int>
x<int> = x<int> + 1;  // verwendet die bereits instanziierte
                      Variable x<int>
x<double> = 3.14;    // x<double> ist eine double-Variable
x<C> = C();          // Typ-Argumente können auch Klassen sein
cout << "x<int>="<<x<int><<" x<double>="<<x<double><< endl;
```

Das Variablen-Template

```
template<typename T> constexpr T pi =
    T(3.1415926535897932384626433L);
```

ist ein typabhängiger Wert, der 3.14... im Datentyp des Typ-Arguments darstellt:

```

template<typename T>
constexpr T Kreisfläche(T r)
{
    return r * r*pi<T>;
}

constexpr auto f1 = Kreisfläche(2); // pi<int>=3, int f1=12
constexpr auto f2 = Kreisfläche(1.0); // pi<double>=3.14...,
                                         double f2=3.14...

```

Für eine Verwendung von Variablen-Templates wie in diesem Beispiel gibt es aber nur wenig Anwendungen. Vielmehr werden Variablen-Templates für typabhängige Werte in Funktions-Templates verwendet. Diese sind dann meist *constexpr*-Konstanten, die bei der Kompilation bekannt sind.

Beispiel: Die type traits (siehe Abschnitt 14.4.1) geben das Ergebnis einer Typ-Prüfung in C++11 über ein *static* Element mit dem Namen *value* zurück. Mit den Variablen-Templates von C++14 wurden diese type traits Klassen um Elemente mit der Namensendung *\_v* ergänzt, bei denen *::value* in der Abfrage weggelassen werden kann:

```

template <typename T>
T test_type(T x)
{
    if constexpr (std::is_floating_point<T>::value) { } // C++11
    if constexpr (std::is_floating_point_v<T>) { } // C++17
}

```

Variablen-Templates mit **Nicht-Typ-Parametern** ermöglichen eine kompakte und intuitive Definition von Funktionen

```

template <int n> constexpr int Quadrat = n * n;
constexpr int q = Quadrat<3>; // q=9

```

Diese rekursive Variante

```

template <uint64_t n>
constexpr auto Fibonacci = Fibonacci<n - 1> + Fibonacci<n - 2>;

template <>
constexpr auto Fibonacci<0> = 0;

template <>
constexpr auto Fibonacci<1> = 1;

constexpr int f10 = Fibonacci<10>; // 55

```

ist die einfachste Version der Fibonacci-Zahlen (siehe auch Abschnitt 2.7.3), die ich kenne.

## 14.4 Typ-Argument abhängige Templates mit Type Traits

Im Folgenden wird gezeigt, wie man in Abhängigkeit vom Datentyp eines Typ-Arguments unterschiedliche Templates erzeugen kann. Dazu werden oft die nach

```
#include <type_traits>
```

im Namensbereich *std* verfügbaren **type traits Klassen** verwendet. Sie ermöglichen, die Kategorie von Typ-Argumenten zu klassifizieren, Anweisungen in Abhängigkeit von den Typ-Argumenten zu optimieren, Fehler zu entdecken und Typen zu transformieren. In der Microsoft Dokumentation wird „type traits“ mit „Typmerkmale“ übersetzt.

### 14.4.1 Eine Konstruktion von type traits

Zunächst soll kurz skizziert werden, wie man sich die Konstruktion von type traits vorstellen kann. Die Boost-Bibliothek ([www.boost.org/](http://www.boost.org/)) hat auf diese Weise schon einige type traits zur Verfügung gestellt, bevor diese in C++11 aufgenommen wurden. Allerdings kann man nicht alle type traits auf diese Weise konstruieren.

Beginnen wir zunächst mit dem Beispiel des Datentyps *void*:

- Das Klassen-Template *is\_void<T>* hat ein Element *value* mit dem Wert *false*.

```
template <typename T>
struct is_void
{ static constexpr bool value = false; };
```

- In einer **expliziten Spezialisierung** für den Typ *void* hat *value* den Wert *true*.

```
template <>
struct is_void<void>
{ static constexpr bool value = true; };
```

Dann ist der Ausdruck *is\_void<T>::value* in einem Template mit dem Typ-Parameter *T* genau dann *true* wenn das Template-Argument *void* ist.

Für Typkategorien wird das mit einer **partiellen Template-Spezialisierung** erreicht. Das soll am Beispiel von *is\_pointer<T>* illustriert werden.

- Ein primäres Template *is\_pointer<T>* hat ein Element *value* mit dem Wert *false*.

```
template <typename T>
struct is_pointer
{ static constexpr bool value = false; };
```

- In einer partiellen Spezialisierung für Zeiger hat *value* den Wert *true*.

```
template <typename T>
struct is_pointer<T*>
{ static constexpr bool value = true; };
```

Dann ist der Ausdruck `is_pointer<T*>::value` in einem Template mit dem Template-Parameter `T` genau dann `true` wenn das Template-Argument ein Zeiger ist.

Seit C++14 muss man bei der Prüfung von `is_xxx` nicht mehr `value` verwenden

```
std::is_void<T>::value
```

da alle type traits Klassen einen Aufrufoperator bekommen haben. Damit erhält man denselben Wert wie mit `value`:

```
std::is_void<T>()
```

Seit C++17 gibt es die Varianten mit `_v` am Ende des Namens. Bei diesen kann man den Namen allein ohne `::value` oder `()` verwenden:

```
template <typename T> T test_type(T x)
{
    if constexpr (std::is_void<T>::value) {} // C++11
    if constexpr (std::is_void<T>()) {}      // C++14
    if constexpr (std::is_void_v<T>) {}      // C++17
    return x;
}
```

### 14.4.2 Die type traits Kategorien

Im C++-Standard sind die type traits nach Gruppen geordnet. Die folgenden Listen sind nur ein Auszug und sollen nur einen Eindruck davon vermitteln, welche Prüfungen zur Verfügung stehen. Seit C++17 gibt es zu jedem dieser type traits Varianten mit `_v` am Ende des Namens.

- type traits zur Prüfung von Datentypen:

```
// Primary type categories:
template <class T> struct is_void;           // is_void_v
template <class T> struct is_integral;
template <class T> struct is_floating_point;
template <class T> struct is_array;
template <class T> struct is_pointer;
template <class T> struct is_reference;
template <class T> struct is_member_object_pointer;
template <class T> struct is_member_function_pointer;
template <class T> struct is_enum;
template <class T> struct is_union;
template <class T> struct is_class;
template <class T> struct is_function;
...
```



Für einen Zeiger oder eine Referenz auf eine Klasse hat `is_class` den Wert *false*.

- type traits zur Prüfung von Typ-Kategorien:

```
// composite type categories:
template <class T> struct is_arithmetic;
template <class T> struct is_fundamental;
template <class T> struct is_object;
template <class T> struct is_scalar;
template <class T> struct is_compound;
...
```

- type traits zur Prüfung von Eigenschaften von Typen

```
// type properties:
template <class T> struct is_const;
template <class T> struct is_volatile;
template <class T> struct is_polymorphic;
template <class T> struct is_abstract;
template <class T> struct has_trivial_constructor;
template <class T> struct has_trivial_copy;
template <class T> struct has_trivial_assign;
template <class T> struct has_trivial_destructor;
...
```

- type traits zur Prüfung von Beziehungen zwischen Typen

```
// type relations:
template <class T, class U> struct is_same;
template <class Base, class Derived> struct is_base_of;
template <class From, class To> struct is_convertible;
...
```

- type traits zur Transformation von Typen. Diese haben anstelle des Elements *value* ein Element *type*, das den modifizierten Typ enthält.

```
// const-volatile modifications:
template <class T> struct remove_const;
template <class T> struct remove_volatile;
template <class T> struct remove_cv;
template <class T> struct add_const;
template <class T> struct add_volatile;

// reference modifications:
template <class T> struct remove_reference;
template <class T> struct add_lvalue_reference;
template <class T> struct add_rvalue_reference;
```

```
// pointer modifications:
template <class T> struct remove_pointer;
template <class T> struct add_pointer;
...
```

Beispiel: Das Funktions-Template

```
template<typename T>
typename remove_pointer<T>::type r1(T x)
{
    return *x;
}
```

kann so verwendet werden:

```
int* p = new int(17);
int i = r1(p); // i=17
```

### 14.4.3 Type traits und static\_assert

Type traits werden oft als Argumente von *static\_assert* verwendet, um zur Compile-Zeit Typ-Argumente zu prüfen. Ein *static\_assert* wird in einem Template aber nur ausgewertet, wenn aus dem Template eine Funktion oder Klasse erzeugt wird.

Beispiel: Mit dem Funktions-Template

```
template<typename T>
T add(T x, T y)
{
    static_assert(std::is_integral<T>(), "Zahl erwartet");
    return x + y; // oder is_integral<T>::value
}
```

erhält man mit dem Aufruf

```
string s1 = add("x", "y");
```

zur Compile-Zeit die Fehlermeldung „Zahl erwartet“. Mit dem nächsten Aufruf erhält man keine Fehlermeldung

```
int s2 = add(3, 4);
```

C++ verwendet in den Templates der Standardbibliothek oft type traits, um in *static\_assert* (siehe Abschnitt 2.7.4) die Datentypen der Typ-Argumente zu prüfen, fehlerhafte Initialisierungen bereits bei der Kompilation zu diagnostizieren usw.

Beispiel: Aus dem Template *basic\_string* wird nur dann eine Stringklasse erzeugt, wenn das Typ-Argument zur Typ-Kategorie *is\_pod* gehört:

```
template <class CharT, class Traits =
std::char_traits<CharT>>
class basic_string { // aus http://www.open-
// std.org/jtc1/sc22/wg21/docs/papers/2004/n1720.html
static_assert(is_pod<CharT>::value, "Typ-Argument muss
                                POD-Type sein");

// ...
};
```

Die Klasse *unique\_ptr* (siehe Abschnitt 18.2)

```
template<class _Ty, class _Dx> // stark vereinfacht
class unique_ptr
{
public:
    constexpr unique_ptr()
    {
        static_assert(!is_pointer<_Dx>::value,
            "unique_ptr constructed with null deleter pointer");
    }
};
```

gibt eine Fehlermeldung aus, wenn ein unzulässiger deleter angegeben wird.

Die Klasse *ratio* (zur Darstellung von Brüchen, siehe Abschnitt 16.1) gibt eine Fehlermeldung aus, wenn ein Bruch mit dem Nenner 0 initialisiert wird:

```
template<intmax_t _Nx, intmax_t _Dx = 1>
struct ratio
{ // holds the ratio of _Nx to _Dx
    static_assert(_Dx != 0, "zero denominator");
};
```

Als Argumente von *static\_assert* sind beliebige Compile-Zeit Ausdrücke zulässig, wie auch *decltype*-Ausdrücke.

Beispiel: Der Aufruf des Funktions-Templates

```
template <typename T, typename U>
auto add3(T lhs, U rhs) -> decltype(lhs+rhs)
{
    static_assert(std::is_arithmetic<decltype(lhs+rhs)>(),
        "arithmetic type arguments required");
    return lhs+rhs;
}
```

ist nur mit Argumenten eines arithmetischen Datentyps (*int*, *double* usw.) möglich.  
Beim Aufruf von

```
string s1="1", s2="2";
string s=add3(s1,s2);
```

erhält man die Fehlermeldung "arithmetic type arguments required".

### Aufgabe 14.4.3

Eine Klasse C soll in verschiedenen Versionen existieren, die in verschiedenen Header-Dateien wie

```
C1.h // Version 1 der Klasse C
C2.h // Version 2 der Klasse C
```

usw. enthalten sind. Wie kann bereits während der Kompilation sichergestellt werden, dass auch tatsächlich eine bestimmte Version der Klasse mit *#include* eingebunden wird?

### 14.4.4 Templates mit *if constexpr* und type traits optimieren

Mit type traits kann man in einem Template Eigenschaften eines Typ-Arguments überprüfen. Damit kann man während der Kompilation steuern, welche Anweisungen übersetzt werden.

Beispiel: Die Grundidee sieht man hier:

```
template <typename T>
auto get_value(T t)
{
    if constexpr (std::is_pointer_v<T>)
        return *t;
    else
        return t;
}

void use_get_value(int* pi, int i)
{
    cout << "*pi=" << get_value(pi) << " i=" << get_value(i) << "\n";
}
```

Das folgenden Ausführungen zeigen, wie *std::copy* Array-Argumente mit *memmove* und andere Container elementweise kopiert. Dazu wird in Abhängigkeit vom Datentyp der Argumente das optimale Verfahren ausgesucht. In Visual Studio 2019 ist *std::copy* etwa folgendermaßen implementiert:

```
template <class InputIt, class OutputIt> // vereinfacht-RK
OutputIt Copy(InputIt First, InputIt Last, OutputIt Dest)
{ // copy [First, Last) to [Dest, ...)
    if constexpr (Ptr_copy_cat<InputIt, OutputIt>:::
                    Trivially_copyable)
    {
        return copy_with_memmove(First, Last, Dest);
    }
}
```

```

else
{ // Elementweise Kopie, geht mit jedem Datentyp
  for (; First != Last; ++Dest, (void) ++First)
    *Dest = *First;
  return Dest;
}
}

```

Hier wird der Bereich im *else*-Zweig elementweise kopiert, was mit jedem Datentyp funktioniert. Die Bedingung nach *if constexpr* prüft, ob der zu kopierende Speicherbereich auch mit *memmove* kopiert werden kann:

```

template <class InputIt, class OutputIt>
OutputIt copy_with_memmove(InputIt first, InputIt last, OutputIt
                           dest)
{ // vereinfacht - RK
  const auto count = last_char - first_char;
  memmove(dest, first, count); // C-Funktion, kopiert den ganzen
  return (dest + count);       // Block mit einer
}

```

In

```
Ptr_copy_cat<InputIt, OutputIt>::Trivially_copyable
```

wird mit *type\_traits* wie in

```

sizeof(InputIt) == sizeof(OutputIt) &&
is_same_v<bool, InputIt> == is_same_v<bool, OutputIt> &&
is_integral<InputIt> && // bool, char, unsigned char, short, int,
is_integral<OutputIt> // long, long long, unsigned long long> usw.

```

geprüft, ob die Voraussetzungen für eine Kopie des ganzen Speicherblocks mit *memmove* gegeben sind.

Diese Techniken kann man auch in eigenen Programmen zur Optimierung verwenden. Bei den STL-Algorithmen kann man aber davon ausgehen, dass sie bereits von den Compiler-Herstellern implementiert sind (in Visual Studio seit 2008).

#### 14.4.5 Typ-Inferenz mit *decltype*

Wenn der Datentyp (z.B. bei der Definition einer Variablen) nicht explizit angegeben wird, sondern vom Compiler aus einem Ausdruck abgeleitet wird, spricht man von Typ-Inferenz.

Diese Technik wurde schon in C++03 verwendet, um beim Aufruf eines Funktions-Templates den Datentyp des Typ-Arguments aus dem Datentyp des Funktions-Arguments ab (siehe Abschnitt 14.1.2).

In C++11 wurde die Ableitung von Datentypen auf Deklarationen erweitert: Bei einer Deklaration mit *auto* (siehe Abschnitte 2.3.3 und 8.1.11) wie in

```
auto i = 17; // wie int i = 17;
```

wird *auto* durch den Datentyp ersetzt, den der Compiler für den Initialisierungsausdruck abgeleitet hat. Dieser Datentyp wird dabei wie bei der Ableitung des Typ-Arguments beim Aufruf eines Funktions-Templates bestimmt.

Im Folgenden wird gezeigt, wie man mit

*decltype(e)*

zur Compile-Zeit den Datentyp eines Ausdrucks *e* erhält. *decltype* hat Ähnlichkeiten mit *auto*, ist aber nicht auf Initialisierungsausdrücke beschränkt. Weitere Unterschiede:

- *auto* wird oft außerhalb von Templates (in „gewöhnlichen“ Programmen) eingesetzt.
- *decltype* wird vor allem in Templates eingesetzt.
- Der von *auto* abgeleitete Typ kann sich von dem von *decltype* abgeleiteten unterscheiden. Die genauen Regeln für *decltype* sind ziemlich komplex. Deswegen werden hier nur die wichtigsten vorgestellt.

Der Name *typeof* anstelle von *decltype* hätte die Bedeutung klarer zum Ausdruck gebracht. Dieser Name war aber schon vergeben.

In *decltype(e)* kann *e* ein beliebiger Ausdruck sein, z.B. eine Variable oder ein Klassenelement.

Beispiel: Mit

```
struct C {
    int x;
};

int i = 0;
C c;
C* pc;
```

haben *di*, *cx* und *pcx* den als Kommentar angegebenen Datentyp:

```
decltype(i) di;      // wie "int di;"
decltype(c.x) cx;    // wie "int cx"
decltype(pc->x) pcx;  // wie "int pcx"
```

Zwischen *auto* und *decltype* gibt es einige spitzfindige Unterschiede: Bei *decltype* werden im Gegensatz zu *auto* Referenz- und *const*-Angaben berücksichtigt.

Beispiel: Mit

```
const int ci = 19;
int& ri = i;
```

haben *aci*, *dci*, *ar* und *dr* den als Kommentar angegebenen Datentyp:

```

auto aci = ci;           // wie "int aci = ci;"
decltype(ci) dci = 1;    // wie "const int dci = 1;"

auto ar = ri; // wie "int ar = ri;" - nicht int& ar = ri; !!!
decltype(ri) dr; // wie "int& ar = ri;"

```

Wenn bei *decltype* eine Variable oder ein Klassenelement eines Typs T in Klammern angegeben werden, oder das Argument ein anderer Ausdruck eines Datentyps T ist, ist das Ergebnis von *decltype*

T&, falls e ein L-Wert ist (also z.B. eine Variable)

T, falls e ein R-Wert ist (also z.B. ein Literal, ein Ausdruck wie x+y, ein temporäres Objekt)

Es gibt noch weitere Regeln für R-Wert Referenzen, die hier aber nicht behandelt werden sollen.

Beispiel: Die nächsten Deklarationen unterscheiden sich von denen von oben nur dadurch, dass das Argument in Klammern angegeben wird. Dadurch wird der Datentyp zu einem Referenztyp:

```

decltype((i)) dki;       // wie "int& dki;"
decltype((c.x)) dkcx;    // wie "int& dkcx"
decltype((pc->x)) dkpcx; // wie "int& dkpcx"

```

Die nächsten Argumente sind weder Variable noch Klassenelemente. Da es ein R-Wert des Datentyps *int* ist, erhält die Variable i den Datentyp *int*.

```

decltype(3.14 * i) k;    // wie "double k;"
decltype(1) v1;          // wie "int v1; "
decltype(C()) dc;        // wie "C dc;"
decltype(new C()) pc;    // wie "C* pc;"

```

Bei der Auswertung eines *decltype*-Ausdrucks wird nur während der Compile-Zeit der Datentyp bestimmt. Wenn das Argument ein Funktionsaufruf ist, wird die Funktion nicht aufgerufen. Bei einem Klassenelement wird kein Objekt der Klasse angelegt.

In C++11 kann *decltype* nicht als Rückgabetypp eines Funktions-Templates verwendet werden, wenn die Argumente von *decltype* Typ-Parameter sind. Stattdessen muss ein nachstehender Rückgabetypp verwendet werden.

Mit *decltype* kann man in einem Funktions-Template den Rückgabetypp aus den Datentypen der Argumente bestimmen:

Beispiel: Mit der Definition

```
template <typename T, typename U>
auto add(T lhs, U rhs) -> decltype(lhs + rhs)
{
    return lhs + rhs;
}
```

sind die folgenden Aufrufe möglich:

```
auto x = add(1, 2);      // wie "int x = ..."
auto d = add(1, 0.0);    // wie "double d = ..."
std::string s1 = "1", s2 = "2";
auto s = add(s1, s2);    // wie "string s = ..."
auto n = add(s1, "s2");  // wie "string n = ..."
```

Verwendet man *decltype* als Rückgabotyp

```
template <typename T, typename U>
decltype(lhs + rhs) add2(T lhs, U rhs)
{
    return lhs + rhs;
}
```

erhält man mit jedem der beiden Aufrufe

```
int x1 = add2(1, 2);
int y1 = add2<int, int>(1, 2);
```

die Fehlermeldung „Funktionsvorlage 'unknown-type 'add2(T,U)' konnte nicht spezialisiert werden“.

Die etwas umständliche Schreibweise mit dem nachstehenden Rückgabotyp kann seit C++14 durch *decltype(auto)* vereinfacht werden. Damit kann ein Rückgabotyp auch von Typ-Parametern abhängen.

Beispiel: Damit kann man *add* aus dem letzten Beispiel vereinfachen zu

```
template <typename T, typename U>
decltype(auto) add3(T lhs, U rhs)
{
    return lhs + rhs;
}
```

Mit *add3* sind dann dieselben Aufrufe wie mit *add* möglich:

```
auto x3 = add3(1, 2);      // wie "int x3 = ..."
auto d3 = add3(1, 0.0);    // wie "double d3 = ..."
auto s3 = add3(s1, s2);    // wie "string s3 = ..."
auto n3 = add3(s1, "s2");  // wie "string n3 = ..."
```



## 14.5 Variadische Templates

Wenn man in C++03 eine Funktion definieren will, die man mit beliebig vielen Argumenten aufrufen kann, hat man oft für jede Anzahl von Parametern ein eigenes Funktions-Template definiert:

```
template< typename T1>
auto Summe(T1 x1)
{
    return x1;
}

template<typename T1, typename T2>
auto Summe(T1 x1, T2 x2)
{
    return x1+x2;
}

template<typename T1, typename T2, typename T3>
auto Summe(T1 x1, T2 x2, T3 x3)
{
    return x1 + x2+x3;
}

// usw.
```

Damit sind dann Aufrufe mit einer beliebigen Zahl von Argumenten möglich:

```
double s2 = Summe(1, 2);
double s3 = Summe(1, 2.0, 3.0f);
```

Hätte man bei diesen Definitionen die Version mit  $n$  Parametern auf die mit  $n-1$  Parametern zurückgeführt, wäre man schon nahe an variadischen Templates. Bei diesen werden diese rekursiven Schritte vom Compiler durchgeführt:

```
template<typename T1, typename T2>
auto Summe(T1 x1, T2 x2)
{
    return Summe(x1) + x2;
}

template<typename T1, typename T2, typename T3>
auto Summe(T1 x1, T2 x2, T3 x3)
{
    return Summe(x1, x2) + x3;
}
```

### 14.5.1 Variadische Funktions-Templates

In C++11 kann man diese Vielzahl von im Wesentlichen gleichen Definitionen durch ein **variadisches Template** ersetzen.

Ein variadisches Template hat ein sogenanntes **Parameter-Paket** (Parameter-Pack), das oft mit „... Args“ bezeichnet wird:

```
template<typename T, typename... Args>
auto Summe(T first, Args... args)
{
    return first + Summe(args...);
}
```

Ein Parameter-Paket steht für eine beliebige Anzahl von Argumenten. Diese werden vom Compiler in das erste und den Rest aufgeteilt. Damit diese Bedeutung besser zum Ausdruck kommt, soll es in diesem Beispiel mit *Rest* bezeichnet werden:

```
template<typename T, typename... Rest> // Args in Rest umbenannt
auto Summe(T first, Rest... rest)
{
    return first + Summe(rest...); // Rekursionsschritt
}
```

Der Rest wird in rekursiven Schritten aufgelöst, bis ein gewöhnliches Template passt. Dieses gewöhnliche Template stellt die Abbruchbedingung für die Rekursion dar:

```
template<typename T> // Abbruchbedingung für die Rekursion
auto Summe(T v)
{
    return v;
}
```

*Summe* kann dann mit einer beliebigen Anzahl von Argumenten aufgerufen werden:

```
double s3 = Summe(1, 2.0, 3.0f);
```

Aus diesem Aufruf erzeugt der Compiler aus dem variadischen Template dann eine Funktion mit der Parameterliste

```
auto Summe(int a1, double a2, float a3)
{
    ...
}
```

In dieser Funktion werden die Argumente in das erste (das *int*-Argument 1) und die restlichen Argumente (2.0, 3.0f) aufgeteilt. Das erste Argument *a1* wird der Variablen *first* zugewiesen und der Rest (*a2*, *a3*) dem Parameter-Paket:

```
auto Summe(int a1, double a2, float a3)
{
    return a1 + Summe(a2,a3);
}
```

Mit dem Argument (a2,a3) wird aus dem variadischen Template wieder eine Funktion erzeugt und aufgerufen:

```
auto Summe(double a2, float a3)
{
    return a2 + Summe(a3);
}
```

Der Aufruf von *Summe(a3)* führt dann zum Aufruf der Funktion, die die Abbruchbedingung darstellt:

```
auto Summe(float a3)
{
    return a3;
}
```

Insgesamt hat der Compiler aus dem variadischen Template und der Abbruchbedingung dann diese Funktion erzeugt:

```
auto Summe(int a1, double a2, float a3)
{
    return a1 + a2 + a3; // wie eine Schleife über die Argumente
}
```

Bei einem variadischen Template wird das Ellipsis-Symbol ... an verschiedenen Stellen verwendet:

#### 1. In

```
template<typename T, typename... Args>
```

steht ... **vor** einem Namen (hier *Args*) und bedeutet, dass dieser Name für eine beliebige Anzahl von Typ-Parametern steht.

#### 2. In der Parameterliste eines Funktions-Templates

```
auto Summe(T first, Args... args)
```

steht ... **nach** dem Namen aus 1. und bedeutet, dass die Funktion zu jedem Typ-Parameter aus 1. einen Funktionsparameter haben kann. Der anschließend angegebene Name steht dann für die Parameter.

#### 3. Im Anweisungsteil des Funktions-Templates

```
return first + Summe(args...);
```

steht ... dann nach dem Namen der Parameter und bewirkt die rekursive Expansion.

Ein variadisches Template muss mindestens einen Aufruf eines Parameter-Pakets enthalten. Das Parameter-Paket muss immer der letzte Parameter in der Parameterliste sein. Gelegentlich benötigt man die Anzahl der Elemente eines Parameter-Pakets. Diese erhält man mit

```
sizeof...(args)
```

Viele Klassen der Standardbibliothek (z.B. *thread*, siehe Abschnitt 17.1.2) haben Konstruktoren, denen man eine Funktion und direkt danach ihre Argumente übergeben kann. Die folgende Klasse ist eine Alternative zur Klasse *Benchmarktimer* von Abschnitt 13.4, der die Funktion als Lambda-Ausdruck übergeben wird.

```
struct Benchmarktimer_variadic // analog zu 13.4
{
    template<typename F, typename ...Args>
    static std::chrono::milliseconds::rep ms(F func, Args&&... args)
    { // Laufzeit der Funktion func in Millisekunden
        auto start = std::chrono::steady_clock::now();
        func(std::forward<Args>(args)...); // func(args1, ..., argsn)
        auto stop = std::chrono::steady_clock::now();
        return (stop - start).count();
    }
};
```

Die Funktion *ms* dieser Klasse kann mit Funktionen wie

```
int f(int x) { return x; };
int g(int x, int y) { return x + y; };
```

folgendermaßen aufgerufen werden:

```
Benchmarktimer_variadic::ms(f, 1);
Benchmarktimer_variadic::ms(g, 1,2);
```

## Aufgabe 14.5

1. Welche der Anweisungen unter a), b), c) und d) werden mit *Summe1* und *Summe2* kompiliert? Welches Ergebnis haben die Anweisungen, die kompiliert werden können?

```
template<typename T>
auto Summe1(T v)
{
    return v;
}

template<typename T, typename... Args>
auto Summe1(T first, Args... args)
{
    return first + Summe1(args...);
}
```

```
auto Summe2()
{
    return 0;
}

template<typename T, typename... Args>
auto Summe2(T first, Args... args)
{
    return first + Summe2(args...);
}

a) auto s1a = Summe1(1, 2, 3.0);
b) auto s1b = Summe1("1", "2", "3");
c) std::string s1 = "1", s2 = "2", s3 = "3";
   auto s1c = Summe1(s1, s2, s3);
d) constexpr auto s1d = Summe1();
e) auto s2a = Summe2(1, 2, 3.0);
f) auto s2b = Summe2(s1, s2, s3);
g) auto s2c = Summe2();
```

14.5.2 Fold Ausdrücke

Seit C++17 kann ein Parameter-Paket, dessen Elemente mit einem der binären Operatoren

```
fold-operator: one of
+ - * / % ^ & | << >> += -= *= /= %= ^= &= |= <= >= =
== != < > <= >= && || , * ->*
```

verbunden werden, mit einem sogenannten fold-Ausdruck entwickelt werden.

Wenn P ein Parameter-Paket ist und @ für einen dieser Operatoren steht, ist ein Ausdruck, der wie in der zweiten Spalte der nächsten Tabelle gebildet wird, ein **fold-Ausdruck**. Bitte beachten Sie, dass die umgebende Klammer zur Syntax gehört:

|                   | fold-Ausdruck    | Expansion                                                              |
|-------------------|------------------|------------------------------------------------------------------------|
| unary right fold  | (P @ ...)        | P <sub>1</sub> @ ( ... @ (P <sub>n-1</sub> @ P <sub>n</sub> ))         |
| unary left fold   | (... @ P)        | ((P <sub>1</sub> @ P <sub>2</sub> ) @ ... ) @ P <sub>n</sub>           |
| binary right fold | (P @ ... @ init) | P <sub>1</sub> @ ( ... @ (P <sub>n-1</sub> @ (P <sub>n</sub> @ init))) |
| binary right fold | (init @ ... @ P) | ((init @ P <sub>1</sub> ) @ P <sub>2</sub> ) @ ... ) @ P <sub>n</sub>  |

Dabei wird das Parameter-Paket P vom Compiler schrittweise rekursiv in seine Elemente P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, ..., P<sub>n</sub> zerlegt.

Damit kann man ein variadisches Funktions-Template mit einer Syntax mit drei Punkten ... schreiben, die in der Mathematik oft für eine unbestimmte Anzahl von Werten verwendet wird.

Beispiel: Ein variadisches Funktions-Template wie *Summe* aus dem letzten Abschnitt benötigt zwei Definitionen: Eine für den Rekursionsschritt und eine für die Abbruchbedingung. Mit dem binary right fold erreicht man denselben Effekt einfacher mit einer einzigen Definition:

```
template<typename T, typename... Args>
constexpr auto Summe_brf(Args... args)
{
    return (0+...+args);
}
```

Genauso gut hätte man hier auch einen binary left fold verwenden können:

```
template<typename T, typename... Args>
constexpr auto Summe_blf(Args... args)
{
    return (args + ... + 0);
}
```

Mit einem unary fold wäre die Definition sogar noch etwas kürzer geworden:

```
template<typename T, typename... Args>
constexpr auto Summe_urf(Args... args)
{
    return (args + ... );
}

template<typename T, typename... Args>
constexpr auto Summe_ulf(Args... args)
{
    return (... + args);
}
```

Diese vier Varianten sollten nur die syntaktischen Unterschiede zeigen. Mit allen diesen Funktionen erhält man dasselbe Ergebnis.

Da zu den zulässigen Operatoren auch der Komma-Operator gehört, können auch Anweisungen (z.B. die Ausgabe von Werten) über ein variadisches Funktions-Template erfolgen.

```
template<typename... Args>
constexpr void Print_k(Args... args)
{
    return ((cout<<args<<endl),... );
}
```

Fold-Ausdrücke können auch mit Lambda-Ausdrücken verwendet werden:

```
constexpr auto Quadratsumme=[](auto... n) { return ((n * n) + ...);
constexpr int p = Quadratsumme(1, 3, 9); // p=91
```

### 14.5.3 Variadische Klassen-Templates am Beispiel von *std::tuple*

Variadische Klassen-Templates können im Wesentlichen wie variadische Funktions-Templates definiert werden. Nach der Definition eines Klassen-Templates mit einem Parameter-Paket

```
template<typename T, typename... Rest>
struct Tuple<T, Rest...>
{
    ...
};
```

kann man ein Objekt dieses Typs mit einer beliebigen Anzahl von Typ-Argumenten anlegen.

Im Folgenden soll das am Beispiel einer Klasse *Tupel* gezeigt werden, die im Wesentlichen wie die nach

```
#include <tuple>
```

verfügbare Klasse *std::tuple* verwendet werden kann (siehe Abschnitt 11.4.2). Ein *tuple* ist eine Zusammenfassung von Elementen, die wie ein *struct* verschiedene Datentypen haben können (wie z.B. Paare, Tripel, Quadrupel usw.). Einen Tupel-Typ erhält man durch die Angabe der Datentypen als Typ-Argumente.

Beispiel: Die *tuple*-Variable *t1* besteht aus einem Element des Datentyps *int* mit dem Wert 1. *t2* besteht aus einem *double* und einem *int* mit den Werten 1 und 2:

```
tuple<int> t1(1);
tuple<double, int> t2(1, 2);
```

Ein variadisches Klassen-Template kann wie ein variadisches Funktions-Template mit einer Klasse für die Abbruchbedingung

```
template <typename... T> // Abbruchbedingung für die Rekursion
struct Tuple { };
```

und einer für den Rekursionsschritt definiert werden:

```
template<typename T, typename... Rest> // Rekursionsschritt
struct Tuple<T, Rest...>
{
    T          first;
    Tuple<Rest...> rest;

    Tuple(const T& f, const Rest& ... r) : first(f), rest(r...)
    {
        std::cout << f << endl;
    }
};
```

Mit diesem Template kann dann

```
Tuple<int, char, string> t(1, 'x', "123");
```

eine Variable definieren. Dabei finden dann etwa diese rekursiven Ersetzungen statt:

```
struct Tuple<int, Rest...> {
    int          first=1;
    Tuple<Rest=<'x', "123">...> rest;
    struct Tuple<char, Rest=<"123">.> // Rekursionsschritt
    {
        char          first='x';
        struct Tuple<"123"> // Rekursionsschritt
        {
            std::string          first="123";
        };
    };
};
```

## 14.6 Concepts

Wie in Abschnitt 14.1.3 dargestellt wurde, kann die Fehlersuche bei Templates ziemlich mühsam werden, wenn bei der Spezialisierung eines Templates ein Typ-Argument angegeben wird, für das nicht alle Operationen definiert sind.

Dieses Problem wurden in C++20 mit concepts gelöst: Ein concept stellt Anforderungen an ein Template-Argument dar. Wenn dann ein Template mit einem Typ-Argument spezifiziert wird, das diese Anforderungen nicht erfüllt, erzeugt der Compiler eine Fehlermeldung. Da diese Fehlermeldung an der Stelle angezeigt wird, an der das falsche Argument angegeben ist, kann man die Ursache für den Fehler leicht erkennen und beheben. Ein concept erzeugt keinen ausführbaren Code und führt deshalb auch nicht zu einer längeren Laufzeit, sondern bewirkt lediglich Prüfungen bei der Kompilation.

Auf der Basis von concepts wurden dann die Algorithmen der Standardbibliothek für sogenannte ranges neu formuliert (siehe Abschnitt 14.6.3). Hier steht range für einen Bereich von Werten, z.B. einen Container wie `vector<int>`.

Bei der Fertigstellung dieses Buches im Juni 2020 waren in Visual Studio nur concepts, aber noch keine ranges verfügbar. Die folgenden Ausführungen sollen deshalb nur die Grundideen skizzieren. Da die Verwendung von concepts und ranges aber sehr einfach ist, dürften diese Grundideen reichen, sie einsetzen, wenn sie dann verfügbar sind (vermutlich schon, wenn Sie dieses Buch lesen).

### 14.6.1 concepts mit *requires*-Ausdrücken

Bei der Definition eines Funktions- oder Klassen-Templates können mit einer *requires*-Klausel Anforderungen angegeben werden. Wenn dann ein Typ-Argument diese Anforderungen nicht erfüllt, erzeugt der Compiler eine Fehlermeldung.



Eine solche Anforderung kann als *concept* definiert werden (es gibt aber auch noch andere Möglichkeiten). Der Name des concepts steht dann für die Anforderungen, die in einer *requires*-Klausel angegeben werden.

Beispiel: Durch

```
template<typename T>
concept Hat_f = requires(T a) { // sehr einfaches Beispiel
    { a.f() }; // Anforderung: T muss eine Funktion f() haben
};
```

wird ein concept mit dem Namen *Hat\_f* definiert. Dieses concept verlangt, dass der Datentyp *T* eine Elementfunktion *f* hat.

Ein concept kann in einer *requires*-Klausel bei einem Template angegeben werden. Solche Klauseln können bei einem Funktions- oder Klassentemplate nach „template < ... >“ angegeben werden. Diese Klauseln bedeuten, dass das jeweilige Typ-Argument die Anforderungen des concepts erfüllen muss.

Beispiel: Das Funktions-Template *verwende\_f* verlangt, dass das Typ-Argument für *X* das concept *Hat\_f* erfüllt:

```
template <typename X> requires Hat_f<X> // eine einfachere
void verwende_f(X x) // Schreibweise folgt anschließend
{
    x.f();
}
```

Diese Anforderung ist für ein Argument des Typs *double* nicht erfüllt:

```
double d; // double hat keine Elementfunktion f
verwende_f(d); // Fehler: Die zugeordneten Einschränkungen
                werden nicht erfüllt.
```

Deswegen erhält man beim Aufruf dieser Funktion die als Kommentar angegebene Fehlermeldung, und zwar an der Stelle des Aufrufs von *verwende\_f*, und nicht etwa in der Funktion *verwende\_f* beim Aufruf von *x.f()*.

Ruft man *verwende\_f* dagegen mit einem Argument eines Typs

```
class C_mit_f
{
public: void f() {};
};
```

auf, erhält man keine Fehlermeldung:

```
C_mit_f c;
verwende_f(c); // kein Fehler
```

Die Schreibweise mit *requires* nach „template < ... >“

```
template<typename T> requires C<T>
```

kann abgekürzt werden, indem man anstelle von *typename* oder *class* den Namen des concepts angibt:

```
template<C T> // diese Schreibweise ist üblich
```

Beide Schreibweisen sind gleichwertig.

Beispiel: Anstatt

```
template <typename X> requires Hat_f<X> // eine einfachere
void verwende_f(X x) // Schreibweise folgt anschließend
{
    x.f();
}
```

schreibt man üblicherweise

```
template <Hat_f X>
void verwende_f0(X x)
{
    x.f();
}
```

Die requirements von C++ sind keine Datentypen, die wie in vielen anderen Programmiersprachen vorschreiben, dass das Typargument ein bestimmter Datentyp sein muss. Vielmehr ist ein requirement universeller und kann Anforderungen enthalten, die unabhängig von einer Klassenhierarchie sind.

Die nächsten Beispiele sollen nur kurz zeigen, welche Anforderungen eine *requires*-Klausel bei der Definition eines concepts enthalten kann.

```
template<typename T>
concept VerschiedeneAnforderungen = requires(T x)
{
    x.f(); // T muss eine Elementfunktion f haben
    T::x(); // T muss eine static Elementfunktion x haben
    h(x); // Es muss eine globale Funktion h geben
    x.g() ->std::convertible_to<int>; //muss in int konvertierbar sein
    x.h() ->std::same_as<int>;
};
```

```
template<typename T>
concept Anforderungen_Mit_einem_Parameter = requires(T x, int i)
{
    x.f(i); //T muss eine Elementfunktion mit einem int-Parameter haben
};
```

### 14.6.2 Vordefinierte concepts

Ein concept ist ein Prädikat (ein boolescher Wert), das zur Compile-Zeit ausgewertet wird. Wenn es den Wert *true* hat, wird es vom Compiler akzeptiert. Falls nicht, erzeugt der Compiler eine Fehlermeldung.

Die Standardbibliothek enthält zahlreiche vordefinierte concepts, die nach

```
#include <concepts>
```

im Namensbereich *std* verfügbar sind.

Viele dieser concepts sind nicht mit *requires*-Klauseln, sondern mit type traits definiert.

Beispiel: Das concept *integral* hat den Wert *true*, wenn der type traits Ausdruck *is\_integral* den Wert *true* hat:

```
template <class T>
concept integral = is_integral_v<T>;
```

Deswegen ist für

```
template<std::integral T>
class Counter
{
    T n;
public:
    Counter() : n{0}{}
    void Increment() { n++; }
};
```

die Spezialisierung mit *int* möglich, aber nicht die mit *double*:

```
Counter<int> ci;
Counter<double> cd; // Fehler: Die zugeordneten Einschränkungen werden nicht erfüllt.
```

Weitere concepts sind ähnlich definiert, wie z.B.

```
template < class T >
concept signed_integral = std::integral<T> && std::is_signed_v<T>;

template< class Derived, class Base > // etwas vereinfacht
concept derived_from =
    std::is_base_of_v<Base, Derived> &&
    std::is_convertible_v<const Derived*, const Base*>;
```

Hier sieht man, wie concepts mit *&&* oder *||* kombiniert werden können.

### 14.6.3 Ein Ausblick auf ranges: Algorithmen mit concepts

In C++20 sind im Namensbereich `std::ranges` Versionen der nach `#include <algorithm>` verfügbaren Algorithmen definiert, die die Typ-Argumente mit concepts prüfen. Da diese bei der Fertigstellung dieses Buches aber noch nicht verfügbar waren, sollen sie nur am Beispiel des Algorithmus `sort` illustriert werden. Die anderen Algorithmen können ähnlich verwendet werden.

Die Anforderungen an einen Datentyp, der sortiert werden kann, sind in einem concept `Sortable` zusammengefasst. Der Algorithmus `sort` im Namensbereich `std::ranges` prüft dann das Argument auf dieses concept und ruft `std::sort` auf:

```
namespace std::ranges
{
    template<Sortable S>
    void sort(S& s)
    {
        std::sort(s.begin(), s.end());
    }
}
```

Da ein `vector` die Anforderungen des concepts `Sortable` erfüllt, kann er einfach mit

```
std::vector<int> v;
std::ranges::sort(v);
```

sortiert werden. Die Argumente `v.begin()` und `v.end()` sind nicht mehr notwendig.

## 14.7 Kovarianz und Kontravarianz

Damit Objekte eines Klassen-Templates einander zugewiesen werden können, müssen ihre Typ-Argumente nicht gleich sein. Mit einem Klassen-Template `G`, Klassen `C`, `D`, wobei `D` implizit in `C` konvertierbar ist, und Objekten `gc` und `gd`

```
G<C> gc;
G<D> gd;
```

bezeichnet man das Template `G` als

**kovariant**, wenn die Zuweisung `gc=gd` zulässig ist, bzw. als  
**kontravariant**, wenn die Zuweisung `gd=gc` zulässig ist.

Die nächste Tabelle zeigt für einige C++-Templates ihre Kovarianz- und Kontravarianz-Eigenschaften:

|                           | kovariant           | kontravariant       |
|---------------------------|---------------------|---------------------|
| STL-Container             | nein                | nein                |
| std::initializer_list<T*> | nein                | nein                |
| std::shared_ptr<T>,       | ja                  | nein                |
| std::weak_ptr<T>          | ja                  | nein                |
| std::pair<T*, U*>         | ja                  | nein                |
| std::tuple<T*, U*>        | ja                  | nein                |
| std::function<R*(T*)>     | ja, im Rückgabetypp | ja, im Parametertyp |

## 15 STL-Algorithmen und Lambda-Ausdrücke

Die Standardbibliothek enthält über 100 Algorithmen für viele Aufgaben, die vor allem bei der Arbeit mit Containern immer wieder anfallen. Sie stehen nach

```
#include <algorithm> // oder import std.core; (siehe Abschnitt 2.13)
```

im Namensbereich *std* zur Verfügung. Diese Algorithmen sind Funktions-Templates, denen oft Iteratoren und Operationen als Argumente übergeben werden. Da Iteratoren Bereiche in Containern der STL, in Arrays und in Dateien beschreiben können, kann man diese Algorithmen mit vielen Containern fast beliebiger Elementtypen aufrufen. Die Operationen, die ein Algorithmus mit den Elementen eines Containers durchführt, werden oft als Lambda-Ausdruck übergeben. Deshalb kann ein Algorithmus nahezu beliebige Anweisungen ausführen.

Im Folgenden werden nicht alle Algorithmen dargestellt. Es soll vor allem gezeigt werden, wie die Algorithmen aufgebaut sind, und wie sie verwendet werden können. Da viele Algorithmen ähnlich aufgebaut sind, dürfte es nicht schwerfallen, auch die anderen zu verwenden.

Die Algorithmen werden oft nach den Auswirkungen auf den als Argument übergebenen Bereich zusammengefasst: Die Algorithmen von Abschnitt 15.2 werden als nicht modifizierende Algorithmen bezeichnet, da sie keine Werte in diesem Bereich verändern. Die übrigen Algorithmen verändern Werte oder ihre Anordnung und werden deshalb auch als mutierende Algorithmen bezeichnet.

In C++17 wurden viele der STL-Algorithmen mit parallelen Versionen überladen, bei denen Teilaufgaben auf verschiedene Threads (siehe Abschnitt 17.1) verteilt werden. Einige dieser parallelen Varianten werden in Abschnitt 15.10 vorgestellt.

Ab C++20 sind die STL-Algorithmen *constexpr*. Außerdem gibt es diese Algorithmen ab C++20 mit ranges und concepts (siehe Abschnitt 14.6).

Microsoft hat seine Implementation der C++ Standardbibliothek im November 2019 als open source veröffentlicht.

## 15.1 Iteratoren

Neben Templates und Funktionsobjekten sind Iteratoren ein weiteres Grundkonzept, auf dem die STL beruht. Ein Iterator ist eine Variable bzw. ein Datentyp, der auf ein Element eines Containers zeigt. Für Iteratoren sind bestimmte Operationen definiert, die es ermöglichen, die Elemente eines Containers zu durchlaufen. So bewirkt z.B. der für jeden Iterator definierte Operator ++, dass der Iterator anschließend auf das nächste Element des Containers zeigt. Mit den ebenfalls in allen Iteratoren definierten Operatoren \* und -> kann man das Element ansprechen, auf das er zeigt.

Alle STL Containerklassen haben Iteratoren. Das sind Klassen, die in den Containerklassen definiert sind und die in jeder Containerklasse den Namen *iterator* haben. Deshalb können sie in beliebigen Containerklasse verwendet werden wie in

```
typedef vector<int> Container;  
typedef Container::iterator Iterator;
```

Da die verschiedenen Container (z.B. *list*, *vector* oder *set*) intern völlig unterschiedlich implementiert sind, ist auch der Operator ++ in jeder Containerklasse unterschiedlich implementiert. Da jeder Operator aber in allen Containern dieselbe Bedeutung hat, kann man alle Container mit derselben Syntax durchlaufen, ohne dass man sich um die Details der Implementierung kümmern muss.

Damit eine Klasse ein Iterator ist, müssen lediglich die entsprechenden Operatoren definiert sein. Deshalb sind alle Klassen Iteratoren, die diese Operatoren haben. Da die STL-Algorithmen nur diese Operatoren verwenden, können alle Algorithmen mit allen Containern arbeiten, die die jeweils notwendigen Iteratoren haben.

Mit dieser eigentlich sehr einfachen, aber doch auch recht abstrakten Technik wird die Vielseitigkeit der STL erreicht. Sie beruht insbesondere nicht auf einem objektorientierten Ansatz, bei dem alle Containerklassen von einer gemeinsamen Basisklasse abgeleitet sind.

Da ein Iterator nur einen Teil der Operatoren eines Zeigers hat, werden Iteratoren auch als verallgemeinerte Zeiger bezeichnet. Deshalb können viele STL-Algorithmen auch mit konventionellen Arrays aufgerufen werden. Der Begriff „verallgemeinerter Zeiger“ sollte aber nicht zu philosophischen Grübeleien über verallgemeinerte Zeiger „an sich“ verleiten. Viele Leute haben schon genügend Schwierigkeiten, mit gewöhnlichen Zeigern richtig umzugehen.

### 15.1.1 Die verschiedenen Arten von Iteratoren

Verschiedene Algorithmen benötigen Iteratoren, für die unterschiedliche Operationen zulässig sind. So müssen z.B. für die Iteratoren *first* und *last* in

```
template <class InputIterator, class Function>
Function for_each(InputIterator first,
    InputIterator last, Function f)
{
    while (first != last) f(*first++);
    return f;
}
```

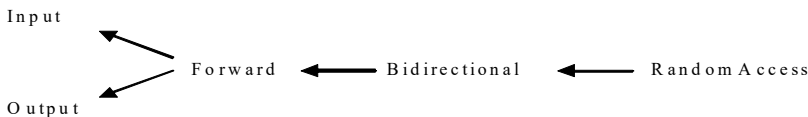
die Operatoren ++ und != definiert sein. In *replace* muss außerdem eine Zuweisung an das Element *\*first* möglich sein:

```
template <class ForwardIterator, class T>
void replace(ForwardIterator first, ForwardIterator last,
    const T& old_value, const T& new_value) {
    while (first != last)
    {
        if (*first == old_value) *first = new_value;
        ++first;
    }
}
```

Die unterschiedlichen Anforderungen der Algorithmen an die Iteratoren werden in der STL in den folgenden fünf Kategorien zusammengefasst. Damit ein Iterator zu einer dieser Kategorien gehört, muss seine Komplexität für jede dieser Operationen konstant sein.

|           | Output-<br>Iterator | Input-<br>Iterator | Forward-<br>Iterator | Bidirection-<br>nalIterator | RandomAccess-<br>Iterator |
|-----------|---------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Lesen     |                     | =*p                | =*p                  | =*p                         | =*p                       |
| Zugriff   |                     | ->                 | ->                   | ->                          | ->, []                    |
| Schreiben | *p=                 |                    | *p=                  | *p=                         | *p=                       |
| Iteration | ++                  | ++                 | ++                   | ++, --                      | ++, --, +, -, +=, -=      |
| Vergleich |                     | ==, !=             | ==, !=               | ==, !=                      | ==, !=, <, >, >=, <=      |

Diese Kategorien lassen sich so anordnen:



Hier bedeutet ein Pfeil, dass der Iterator, von dem der Pfeil ausgeht, alle Operationen des Iterators hat, auf den er zeigt. Deswegen kann z.B. ein ForwardIterator überall dort verwendet werden, wo ein Input- oder OutputIterator notwendig ist.

Beispiele: Die Container *list*, *map*, *multimap*, *set* und *multiset* haben bidirektionale Iteratoren und die Container *string*, *deque* und *vector* RandomAccessIteratoren. Da Zeiger auf nicht konstante Arrays RandomAccessIteratoren sind, können alle Algorithmen



men der STL auch mit solchen Arrays aufgerufen werden. Ein Zeiger auf ein konstantes Array ist dagegen nur ein InputIterator. Die später vorgestellten Einfügeiteratoren (siehe Abschnitt 15.1.3) und die OstreamIteratoren sind OutputIteratoren, und die IstreamIteratoren sind InputIteratoren (siehe Abschnitt 15.1.4).

Die Iterator-Kategorie wird in der STL als Name für einen Template-Parameter verwendet. Wenn ein Algorithmus wie *transform* zwei verschiedene Iterortypen derselben Kategorie als Parameter hat, können die Argumente verschiedene

```
template <class InputIterator1, class InputIterator2,
         class OutputIterator, class BinaryOperation>
OutputIterator transform(InputIterator1 first1,
                        InputIterator1 last1, InputIterator2 first2,
                        OutputIterator result, BinaryOperation binary_op)
{
    while (first1 != last1)
        *result++ = binary_op(*first1++, *first2++);
    return result;
}
```

Deswegen kann dieser Algorithmus verschiedene Container kombinieren. Dabei müssen die Datentypen der Elemente nicht gleich sein: Es reicht aus, wenn alle Operationen im Algorithmus ausgeführt werden können.

Beispiel: *transform* fügt die Summe der beiden Werte aus einem *vector* und einem *set* in einen *list*-Container ein:

```
std::vector<int> v = { 1 };
std::set<double> s = { 2 };
std::list<char> l(10); // Platz reservieren
std::transform(v.begin(), v.end(), s.begin(), l.begin(),
               std::plus<double>());

for (const auto& i: l)
    cout << i << " ";
```

### 15.1.2 Umkehriteratoren

Bidirektionale und RandomAccessIteratoren haben **Umkehriteratoren**, die einen Bereich in der umgekehrten Richtung durchlaufen. In diesen Iteratoren mit dem Namen *reverse\_iterator* sind die Operatoren ++, -- usw. dann durch die jeweils „entgegengesetzten“ Operationen definiert:

```
template <class Iterator>
class reverse_iterator // nur ein vereinfachter Auszug
{
    Iterator current;
public:
    reverse_iterator() {}
    explicit reverse_iterator(Iterator x) : current(x) {}
}
```

```
reverse_iterator<Iterator>& operator++()
{
    --current; // nicht ++
    return *this;
}
// ...
}
```

Die in allen STL-Containern definierten Elementfunktionen ***rbegin()*** und ***rend()*** haben einen Umkehriterator als Rückgabewert:

```
reverse_iterator rbegin()
{
    return reverse_iterator(end());
}

reverse_iterator rend()
{
    return reverse_iterator(begin());
}
```

Mit **Umkehriteratoren** kann man einen Bereich **rückwärts** durchlaufen.

Beispiel: Der Elemente von *v* werden in der umgekehrten Reihenfolge ausgegeben durch

```
vector<int> v = { 1,2,3 };
for (auto i = v.rbegin(); i != v.rend(); i++)
    cout << *i << " "; // Ausgabe: 3,2,1
```

Das Funktions-Template

```
template <class Iterator>
reverse_iterator<Iterator> make_reverse_iterator(Iterator i)
```

erzeugt aus dem als Parameter übergebenen Iterator einen *reverse\_iterator*.

### 15.1.3 Einfügefunktionen und Einfügeiteratoren

Die Elementfunktionen der STL-Container (*insert*, *push\_back* usw.) erzeugen automatisch immer dann neue Elemente im Container, wenn das notwendig ist.

Im Unterschied dazu führen die STL-Algorithmen keine solchen Erweiterungen durch, da sie so entworfen sind, dass sie auch mit Arrays arbeiten, die nicht erweitert werden können. Wenn die Algorithmen der STL Daten ausgeben, schreiben sie diese meist in einen Bereich, der durch Iteratoren beschrieben wird.

Beispiel: ***copy*** kopiert die Werte im Bereich [*first*, *last*) in den Bereich ab *result*:

```
template <class InputIterator, class OutputIterator>
OutputIterator copy(InputIterator first,
                   InputIterator last, OutputIterator result)
{
    while (first != last) *result++ = *first++;
    return result;
}
```

Da hier *\*result* überschrieben wird, muss *\*result* vor der Zuweisung existieren, da sonst nicht reservierte Speicherbereiche angesprochen werden.

Es ist allerdings meist etwas umständlich, die Elemente im Zielbereich vor dem Aufruf des Algorithmus zu erzeugen. Diese Notwendigkeit lässt sich mit Einfügefunktionen vermeiden. Sie rufen in einem überladenen Zuweisungsoperator eine Funktion wie *push\_back* auf, die den zugewiesenen Wert in den Container einfügt. Damit können die STL-Algorithmen auch Werte in einen Container einfügen.

Eine solche Einfügefunktion ist *back\_inserter*:

```
template <class Container>
back_insert_iterator<Container> back_inserter(Container& x)
{
    return back_insert_iterator<Container>(x);
}
```

Dieses Funktions-Template gibt einen **Einfügeiterator** zurück, der aus dem Klassen-Template *back\_insert\_iterator* erzeugt wird. Der Zuweisungsoperator dieser Klasse fügt das zugewiesene Element mit *push\_back* in den Container ein:

```
template <class Container> // nur ein vereinfachter Auszug
class back_insert_iterator : public output_iterator {
protected:
    Container* container;
public:
    back_insert_iterator(Container& x) : container(&x) {}
    back_insert_iterator<Container>& operator=
        (typename Container::const_reference value)
    {
        container->push_back(value);
        return *this;
    }
    // ...
};
```

Weitere Einfügefunktionen werden von den Funktions-Templates *front\_inserter* bzw. *inserter* erzeugt, die einen *front\_insert\_iterator* bzw. einen *insert\_iterator* zurückgeben. Der Zuweisungsoperator dieser Klassen fügt ein neues Element mit *push\_front* am Anfang bzw. mit *insert* an einer bestimmten Position des Containers ein, der als Argument für *Container* übergeben wird:

```

template <class Container>
front_insert_iterator<Container> front_inserter(Container& x)
{
    return front_insert_iterator<Container>(x);
}

template <class Container, class Iterator>
insert_iterator<Container> inserter(Container& x, Iterator i)
{
    return insert_iterator<Container>(x, Container::iterator(i));
}

```

Alle diese Iteratoren gehören zur Kategorie OutputIterator und können deshalb anstelle von OutputIteratoren verwendet werden.

Beispiel: Da alle STL-Container die Funktionen *push\_back* und *insert* haben, können *back\_inserter* und *front\_inserter* mit allen Containern verwendet werden:

```

string s1 = "abc", s2, s3, s4;
std::copy(s1.begin(), s1.end(), std::back_inserter(s2));
// s2="abc";

std::copy(s1.begin(), s1.end(), inserter(s3, s3.begin()));
// s3="abc";

```

Da ein *string* kein *push\_front* hat, kann ein *front\_inserter* nicht mit einem *string* verwendet werden:

```

std::copy(s1.begin(), s1.end(), std::front_inserter(s4));
// nicht mit string, aber mit anderen Containern

```

#### 15.1.4 Stream-Iteratoren

Die Stream-Iteratoren *ostream\_iterator* und *istream\_iterator* sind ähnlich wie die Einfügeiteratoren konstruiert. Eine Zuweisung an einen *ostream\_iterator* bewirkt, dass der zugewiesene Wert in einen *ostream* geschrieben wird:

```

template <class T> // nur ein vereinfachter Auszug
class ostream_iterator : public iterator<...> {
private:
    ostream* out_stream;
    const char* delim;
public:
    ostream_iterator(ostream& s) :out_stream(&s), delim(0) {}
    ostream_iterator(ostream& s, const char* delimiter) :
        out_stream(&s), delim(delimiter) {}
}

```

```
ostream_iterator<T>& operator=(const T& value)
{
    *out_stream << value;
    if (delim != 0) *out_stream << delim;
    return *this;
}
// ...
};
```

Beim zweiten Konstruktor dieses Iterators kann man eine zusätzliche Zeichenfolge angeben, die nach jedem Element in den Stream geschrieben wird.

Ein *ostream\_iterator* ist ein OutputIterator. Mit einem solchen Iterator kann ein STL Algorithmus wie *copy* in einen Stream schreiben.

Beispiel: Der folgende Aufruf von *copy* schreibt alle Elemente des Containers *s* zusammen mit jeweils einem Leerzeichen in eine Datei:

```
vector<string> s = { "Chrissie", "und", "Quitschele" };
std::ofstream fout("c:\\test\\outit.txt");
copy(s.begin(), s.end(),
     std::ostream_iterator<std::string>(fout, " "));
```

Mit "\n" anstelle von " " wird jedes Zeichen in eine neue Zeile geschrieben. Mit *cout* anstelle von *fout* werden die Daten in die Konsole geschrieben.

Ein *istream\_iterator* liest Daten aus dem Stream, der bei seinem Konstruktor angegeben wurde. Jeder Aufruf des Operators ++ liest das nächste Element aus dem Stream. Am Ende des Streams liefert der Iterator einen speziellen eindeutigen Wert zurück, den sogenannten *end-of-stream* Iterator. Diesen Wert erhält man auch von einem mit dem Standardkonstruktor erzeugten *istream\_iterator*. Deshalb kann man das Objekt *istream\_iterator<T>()* immer als Iterator für das Ende eines Streams verwenden. Dieser Iterator ist **der einzig zulässige**, der in einer Abfrage auf das Ende eines Streams verwendet werden darf.

```
template <class T> // nur ein vereinfachter Auszug
class istream_iterator :public input_iterator<T> {
    istream* in_stream;
    T value;
public:
    istream_iterator(); // erzeugt den end-of-stream Iterator
    istream_iterator(istream& s); // initialisiert in_stream mit s
    const T& operator*() const { return value; }

    istream_iterator<T>& operator++();
    {
        *in_stream >> value;
        return *this;
    }
};
```

```

istream_iterator<T> operator++(int)
{
    istream_iterator<T, Distance> tmp = *this;
    *in_stream >> value;
    return tmp;
}
};

```

Stream-Iteratoren sind offensichtlich ziemlich „trickreich“ konstruierte Iteratoren. Sie ermöglichen aber, **Container und Streams** mit denselben STL-Algorithmen und damit **einheitlich zu behandeln**. Bei den konventionellen Containern und Streams, die in einer Programmiersprache wie C den Arrays und den durch FILE\* dargestellten Streams entsprechen, ist eine solche einheitliche Behandlung nicht möglich.

Beispiel: Der STL-Algorithmus *copy* kann einen Stream in einen Container einlesen:

```

ifstream fi("c:\\test\\faust.txt");
vector<string> v;
copy(istream_iterator<string>(fi),
     istream_iterator<string>(), back_inserter(v));

```

Hier wird ein mit dem Standardkonstruktor erzeugter *istream\_iterator* verwendet, um bis zum letzten Element des Streams zu lesen.

### 15.1.5 Container-Konstruktoren mit Iteratoren

Alle STL-Container haben Konstruktoren, denen man ein Paar von Iteratoren übergeben kann. Der Container wird dann bei der Konstruktion mit den Elementen aus dem Bereich gefüllt, den die Iteratoren beschreiben.

Beispiel: Der *vector* *v* wird mit den Elementen des Arrays *a* gefüllt:

```

string a[7] = { "Carolin", "die", "kleine", "zappelt", "an",
               "der", "Wäscheleine" };
vector<string> v(a, a + 7);

```

Mit der nach dem letzten *copy*-Beispiel naheliegenden Schreibweise ist *vs* allerdings ein Funktionszeiger und kein *vector*:

```

ifstream fi("c:\\test\\faust.txt");
vector<string> vs1(istream_iterator<string>(fi),
                 istream_iterator<string>());
vs1.push_back(""); // Fehler: vs1 ist keine Klasse

```

Mit der folgenden Schreibweise ist *vs* dagegen ein *vector*, der bei seiner Konstruktion mit den Elementen der Datei gefüllt wird:

```
ifstream fi("c:\\test\\faust.txt");
istream_iterator<string> it1(fi), it2;
vector<string> vs2(it1, it2);
vs2.push_back(""); // das geht
```

Container-Konstruktoren, Einfügeiteratoren, der copy-Algorithmus und die Elementfunktionen *insert* bieten unterschiedliche Möglichkeiten, einen Container zu füllen. Die Anweisungen unter a) bis e) haben alle dasselbe Ergebnis. Wie die nächste Tabelle zeigt, erreichen sie dieses Ergebnis aber mit teilweise beträchtlichen Zeitunterschieden.

```
const int Max = 10'000'000;
vector<int> src(Max);
a) vector<int> dst;
   std::copy(src.begin(), src.end(), back_inserter(dst));
b) dst.reserve(src.size());
   std::copy(src.begin(), src.end(), back_inserter(dst));
c) dst.reserve(src.size());
   for (const auto& i : src)
       dst.push_back(i);
d) vector<int> dst(src.begin(), src.end());
e) dst.insert(dst.end(), src.begin(), src.end());
```

| Benchmarks Visual Studio 2019, x64 Release /O2, n= 10'000'000 |    |    |    |    |    |
|---------------------------------------------------------------|----|----|----|----|----|
| Container füllen                                              | a) | b) | c) | d) | e) |
| Zeiten in Millisekunden                                       | 80 | 30 | 30 | 20 | 20 |

### 15.1.6 Globale Iterator-Funktionen $\Theta$

Für einen STL-Container *c* stehen die Iterator-Funktionen *c.begin* und *c.end* nach

```
#include <iterator> // wird oft von anderen Headern eingebunden
```

auch als globale Funktionen zur Verfügung:

```
template <class C>
auto begin(C& c) -> decltype(c.begin())
{ return c.begin(); }

template <class C>
auto end(C& c) -> decltype(c.end())
{ return c.end(); }
```

Sie ermöglichen für einen Container *c* die Schreibweise *begin(c)* anstelle von *c.begin()*. Diese neue Schreibweise ist an sich kaum ein Vorteil, der ein neues Sprachelement rechtfertigt. Der einzige Vorteil ergibt sich daraus, dass *begin* und *end* auch für Arrays zur Verfügung steht. Dabei wird ein Array mit der wenig verbreiteten Array-Referenz Syntax übergeben, mit der ein Array-Argument nicht in einen Zeiger auf das erste Element konvertiert wird, sondern das gesamte Array darstellt:

```

template <class T, size_t N>
constexpr T* begin(T(&a)[N]) noexcept // Array-Referenz Parameter
{ return a; }

template <class T, size_t N>
constexpr T* end(T(&a)[N]) noexcept
{ return a + N; }

```

Damit können die Algorithmen der STL für Arrays und STL-Container mit derselben Syntax (insbesondere in einem Template) verwendet werden:

```

vector<int> v = { 2,1,3 };
int a[3] = { 2,1,3 };
std::sort(begin(v), end(v));
std::sort(begin(a), end(a));

```

Die Elementfunktionen *cbegin*, *cend*, *cbegin* und *crend* geben denselben Wert zurück wie die Funktionen ohne „c“ am Anfang. Ihr Datentyp ist allerdings ein *const\_iterator*, über den man die Elemente im Container nicht verändern kann. Mit den gleichnamigen globalen Funktionen erhält man denselben Rückgabewert.

Beispiel: `vector<int> vi;`  
`for (auto& i=vi.cbegin(); i!=vi.cend(); i++)`  
`cout<<*i<<endl;`

Weitere globale Funktionen setzen einen Iterator auf eine andere Position:

```

template <class InputIterator, class Distance>
constexpr void advance(InputIterator& i, Distance n);

template <class ForwardIt>
constexpr ForwardIt next(ForwardIt x, DiffType n = 1);

template <class BidirectionalIt>
constexpr BidirectionalIt prev(BidirectionalIt x, DiffType n = 1);

```

Beispiel: `using namespace std;`  
`vector<int> v = { 3, 7, 5, 1 };`  
`auto p=next(begin(v)); // *p = 7`  
`p = next(p, 2); // *p = 1`  
`p = prev(end(v), 2); // *p = 5`  
`p = prev(p); // *p = 7`

## Aufgabe 15.1

1. Verwenden Sie zur Definition der folgenden Funktions-Templates die STL-Algorithmen *sort* und *copy* sowie geeignete Iteratoren. Alle Datensätze, die in eine Datei geschrieben werden, sollen in eine eigene Zeile geschrieben werden.



Die Elemente sollen nicht nur den Datentyp *int* haben können, sondern einen beliebigen Datentyp, für den der Ausgabeoperator `>>` definiert ist.

- a) Das Funktions-Template *writeToFile* soll die Elemente aus dem Bereich *[first, last)* in eine Datei schreiben, deren Name als Parameter übergeben wird.

```
int a[3] = { 1,2,3 };
writeToFile<int>(as, as + 3, "c:\\test\\s.txt");
```

- b) Das Funktions-Template *copyFile* soll eine Datei in eine zweite kopieren. Die Namen der Dateien sollen als Parameter übergeben werden.

```
copyFile<int>("c:\\test\\s.txt", "c:\\test\\sc.txt");
```

- c) Das Funktions-Template *sortFile* soll eine Textdatei sortieren. Dazu sollen die Elemente in einen *vector* eingelesen und dieser dann sortiert werden. Der sortierte *vector* soll dann in die Zieldatei geschrieben werden.

```
sortFile<int>("c:\\test\\s.txt", "c:\\test\\s_sor.txt");
```

- d) Das Funktions-Template *showFile* soll die Elemente einer Datei, deren Namen als Parameter übergeben wird, am Bildschirm ausgeben.

- e) Testen Sie die Funktions-Templates von a) bis e) mit einer sortierten, einer unsortierten, einer leeren und einer Datei mit einem Element des Datentyps *int*. Geben Sie die dabei erzeugten Dateien mit *showFile* aus.

- f) Testen Sie *writeToFile* mit einem selbstdefinierten Datentyp, für den der Ein- und Ausgabeoperator definiert ist (wie z.B. *Bruch* von Aufgabe 8.2.4, 2.)

2. Ergänzen Sie das Klassen-Template *Array* (Aufgabe 14.2, 1.) um einen Datentyp *iterator* sowie um die beiden Elementfunktionen *begin* und *end*. Diese Funktionen sollen einen Zeiger (Datentyp *iterator*) auf das erste bzw. auf das Element nach dem letzten zurückgeben. Mit diesen Ergänzungen soll ein Array dann mit dem folgenden Aufruf des STL-Algorithmus *sort* sortiert werden können:

```
const int n = 100;
Array<int, n> a;
for (int i = 0; i<n; i++) a[i] = n - i;
std::sort(a.begin(), a.end());
```

3. Konstruieren Sie einen *vector<int>* und einen *vector<Bruch>* mit den Werten aus einer Datei, die in Aufgabe 1 angelegt wurde.

## 15.2 Nichtmodifizierende Algorithmen

Als nichtmodifizierende Algorithmen bezeichnet man Algorithmen, die Informationen über einen Bereich (z.B. einen Container) zurückgeben, ohne seine Werte zu verändern. Das sind

z.B. Algorithmen, die nach Werten suchen oder Informationen über einen Bereich zurückgeben (z.B. Anzahl der Elemente, Minimum).

### 15.2.1 Lineares Suchen

Der Algorithmus *find* sucht in einem durch zwei Iteratoren beschriebenen Bereich *[first, last)* nach einem bestimmten Wert. Das Ergebnis ist ein Iterator auf das erste gefundene Element. Falls das Element nicht gefunden wird, ist der Funktionswert das Argument für *last*:

```
template <class InputIterator, class T>
InputIterator find(InputIterator first,
                  InputIterator last, const T& value)
{
    while (first != last && *first != value) ++first;
    return first;
}
```

Um alle Elemente mit einem bestimmten Wert zu suchen, ruft man *find* wiederholt auf und sucht jeweils ab der Position, die auf die zuletzt gefundene folgt.

Beispiel: Einen Container *s* durchsucht man folgendermaßen nach allen Elementen eines bestimmten Wertes:

```
vector< string> v = { "Julia", "Bianca", "Julia" }, r;
auto p = std::find(v.begin(), v.end(), "Julia");
while (p != v.end())
{
    r.push_back(*p);
    p = std::find(p + 1, v.end(), "Julia");
}
int n = r.size(); // 2
```

Aus der Definition von *find* ergibt sich eine lineare Komplexität. Die **assoziativen Container** *map*, *multimap*, *set* und *multiset* haben eine Elementfunktion, die ebenfalls *find* heißt. Diese nutzt die Baumstruktur dieser Container aus und hat eine logarithmische Komplexität. In einem **sortierten Container**, der nicht notwendig assoziativ sein muss, sucht man ebenfalls mit logarithmischer Komplexität mit den binären Suchfunktionen *lower\_bound()*, *upper\_bound()*, *equal\_range()* und *binary\_search()* (siehe Abschnitt 15.8.3).

In der Praxis ist *find* nicht so wichtig, da man genau den gesuchten Wert erhält. Oft sucht man nach Werten, die eine bestimmte Bedingung erfüllen. Das ist mit dem schon in Abschnitt 13.2 vorgestellten Algorithmus *find\_if* möglich, dem man eine Bedingung als Prädikat übergeben kann:

```
template<class InputIterator, class Predicate>
InputIterator find_if(InputIterator first, InputIterator last, Predicate pred);
```

Das erste Element, das eine Bedingung nicht erfüllt, erhält man mit

```
template<class InputIterator, class Predicate>
InputIterator find_if_not(InputIterator first, InputIterator last, Predicate pred);
```

Beispiel: Durch die folgenden Anweisungen erhält *result* den Wert „Maximilian“:

```
vector<string> v = { "Kaiser", "Maximilian", "geb. 1495" };
auto p = std::find_if(v.begin(), v.end(), [](std::string s)
    {return s.find("ximi") != string::npos; });
string result;
if (p != v.end())
    result = *p;
```

Die **find\_first\_of**-Algorithmen liefern einen Iterator auf das erste Element im Bereich [*first1*, *last1*), das im Bereich [*first2*, *last2*) enthalten ist. In der ersten Version werden die Elemente auf Gleichheit geprüft und in der zweiten mit dem binären Prädikat.

```
template<class ForwardIterator1, class ForwardIterator2>
ForwardIterator1 find_first_of(ForwardIterator1 first1,          // Version 1
    ForwardIterator1 last1, ForwardIterator2 first2, ForwardIterator2 last2);
```

```
template<class ForwardIterator1, class ForwardIterator2,
    class BinaryPredicate>
ForwardIterator1 find_first_of(ForwardIterator1 first1,          // Version 2
    ForwardIterator1 last1, ForwardIterator2 first2, ForwardIterator2 last2,
    BinaryPredicate pred);
```

Bei diesen Algorithmen werden die beiden Bereiche durch verschiedene Typen von Iteratoren beschrieben. Deshalb können sie aus verschiedenen Containern sein, die Elemente verschiedener Datentypen enthalten.

Beispiel: `int a[10] = { 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10 };`  
`double d[3] = { 4,2,6 };`  
`int* i = std::find_first_of(a, a + 10, d, d + 3); // *i=2`

Mit **adjacent\_find** kann man benachbarte Werte finden, die gleich sind (Version 1) bzw. für die ein binäres Prädikat den Wert *true* hat (Version 2). Der Funktionswert ist dann ein Iterator auf das erste gefundene Element des ersten solchen Paares. Falls kein solches Paar gefunden wird, ist der Funktionswert das Argument für *last*.

```
template<class ForwardIterator>                                // Version 1
ForwardIterator adjacent_find(ForwardIterator first, ForwardIterator last);
```

```
template<class ForwardIterator, class BinaryPredicate>        // Version 2
ForwardIterator adjacent_find(ForwardIterator first, ForwardIterator last,
    BinaryPredicate pred);
```

Beispiel: `deque<string> v = { "12", "12", "123", "" };`  
`auto i = adjacent_find(v.begin(), v.end()); // *i="12"`  
`auto j = adjacent_find(v.begin(), v.end(),`  
 `[](string n, string m) {return n.length()==m.length()+3; });`  
`// *j= "123"`

Falls das binäre Prädikat bei einer Ungleichheit der beiden Argumente den Wert *true* zurückgibt, kann man mit *adjacent\_find* auch benachbarte Werte finden, die verschieden sind.

### 15.2.2 Zählen

Der Funktionswert von ***count*** bzw. ***count\_if*** ist die Anzahl der Elemente im Bereich [*first*, *last*), die den Wert *value* haben bzw. das Prädikat *pred* erfüllen. Sein Datentyp ist ein Ganzzahltyp mit Vorzeichen.

```
template<class InputIterator, class T>
iterator_traits<InputIterator>::difference_type count(InputIterator first,
    InputIterator last, const T& value);

template<class InputIterator, class Predicate>
iterator_traits<InputIterator>::difference_type
count_if(InputIterator first, InputIterator last, Predicate pred);
```

Die Komplexität dieser Algorithmen ist linear. Die assoziativen Container (*set*, *multiset*, *map* und *multimap*) haben eine Elementfunktion mit dem Namen *count* mit einer logarithmischen Komplexität.

Beispiel: Bei einem sequenziellen Container *s* kann man *count* folgendermaßen aufrufen:

```
string s = "Bei Bruno im Stern versackt man gern";
int i = count(s.begin(), s.end(), 'e'); // i=4
int j = count_if(s.begin(), s.end(),
    [](char n) {return n >= 's'; }); // j=5
```

Bei einem *set* oder *map* verwendet man besser die Elementfunktion. Sie liefert bei einem *map* die Anzahl der Elemente mit einem bestimmten Schlüsselwert:

```
set<int> s; map<int, int> m;
s.count(2);
m.count(2);
```

### 15.2.3 Der Vergleich von Bereichen

Mit ***equal*** kann man prüfen, ob zwei Bereiche dieselben Elemente enthalten bzw. ob alle Elemente bezüglich eines binären Prädikats gleich sind:

```
template<class InputIterator1, class InputIterator2>
bool equal(InputIterator1 first1, InputIterator1 last1, InputIterator2 first2);

template<class InputIterator1, class InputIterator2, class BinaryPredicate>
bool equal(InputIterator1 first1, InputIterator1 last1, InputIterator2 first2,
    BinaryPredicate pred);
```

Hier wird für den zweiten Bereich nur ein Iterator auf das erste Element angegeben. Diese Algorithmen setzen voraus, dass im zweiten Bereich mindestens *last1 - first1* Elemente auf

den Iterator *first2* folgen. Da die Iteratortypen *InputIterator1* und *InputIterator2* verschieden sind, können mit *equal* auch Bereiche aus Containern verschiedener Datentypen verglichen werden:

Beispiel: Der Wert von *b1* gibt an, ob beide Container dieselben Elemente enthalten, und der von *b2*, ob alle Elemente des ersten kleiner oder gleich allen Elementen des zweiten Containers sind:

```
list<int> l1 = { 1,2,2,2 }, l2 = { 1,2,3,2 };
bool b1 = equal(l1.begin(), l1.end(), l2.begin()); // false
bool b2 = equal(l1.begin(), l1.end(), l2.begin(),
    less_equal<int>()); // b2==true
```

Der Funktionswert von *mismatch* ist ein *pair* von Iteratoren auf die ersten nicht übereinstimmenden Elemente. Falls die beiden Bereiche identisch sind, ist er das *pair* (*last1*,*end*). Dabei ist *end* der Ende-Iterator des zweiten Bereichs.

```
template<class InputIterator1, class InputIterator2>
pair<InputIterator1, InputIterator2> mismatch(InputIterator1 first1,
    InputIterator1 last1, InputIterator2 first2);

template<class InputIterator1, class InputIterator2,
    class BinaryPredicate> pair<InputIterator1, InputIterator2>
mismatch(InputIterator1 first1, InputIterator1 last1, InputIterator2 first2,
    BinaryPredicate pred);
```

Beispiel: `string s1="Tour de Alb mit Heidi", s2="Tour de Alb + Humphrey";`  
`std::pair<string::iterator, string::iterator>`  
`p = mismatch(s1.begin(), s1.end(), s2.begin());`  
`// p.first="mit Heidi", p.second="+ Humphrey"`

Die lexikografische Anordnung der Elemente von zwei Bereichen kann mit den nächsten beiden Funktionen bestimmt werden:

```
template<class InputIterator1, class InputIterator2>
bool lexicographical_compare (InputIterator1 first1, InputIterator1 last1,
    InputIterator2 first2, InputIterator2 last2);

template<class InputIterator1, class InputIterator2, class Compare>
bool lexicographical_compare(InputIterator1 first1, InputIterator1 last1,
    InputIterator2 first2, InputIterator2 last2, Compare comp);
```

Der Funktionswert dieser beiden Algorithmen ist *true*, falls die erste Folge lexikografisch vor der zweiten kommt. Falls die erste Folge kürzer ist als die zweite und in allen Elementen mit der zweiten übereinstimmt, kommt die erste vor der zweiten.

#### 15.2.4 Suche nach Teilfolgen

Mit *search* und *find\_end* kann man prüfen, ob eine Folge von Werten in einem Bereich enthalten ist. Der Funktionswert von *search* ist dann ein Iterator auf die Position des ersten

Elements in der ersten so gefundenen Folge. Im Unterschied zu *search* sucht *find\_end* von hinten und liefert die Position des ersten Elements in der letzten so gefundenen Teilfolge. Falls die gesuchte Folge nicht gefunden wird, ist der Funktionswert *last1*.

```
template<class ForwardIterator1, class ForwardIterator2>
ForwardIterator1 search (ForwardIterator1 first1, ForwardIterator1 last1,
    ForwardIterator2 first2, ForwardIterator2 last2);

template<class ForwardIterator1, class ForwardIterator2,
    class BinaryPredicate>
ForwardIterator1 search(ForwardIterator1 first1, ForwardIterator1 last1,
    ForwardIterator2 first2, ForwardIterator2 last2, BinaryPredicate pred);

template<class ForwardIterator1, class ForwardIterator2>
ForwardIterator1 find_end (ForwardIterator1 first1, ForwardIterator1 last1,
    ForwardIterator2 first2, ForwardIterator2 last2);
```

Beispiel: In einem *string* kann man sowohl mit *search* als auch mit der Elementfunktion *find* nach einer Zeichenfolge suchen:

```
string s1 = "12342356", s2 = "23";
string::iterator i = search(s1.begin(), s1.end(),
    s2.begin(), s2.end()); // i-s1.begin() = 1
string::iterator j = find_end(s1.begin(), s1.end(),
    s2.begin(), s2.end()); // j-s1.begin() = 4
```

Wie die Benchmarks in der nächsten Tabelle zeigen, ist *find* meist schneller. *search* steht aber auch für andere Container zur Verfügung, die keine Elementfunktion zum Suchen haben. Weitere Varianten von *std::search* verwenden den **Boyer-Moore** Algorithmus.

Die folgenden Laufzeiten wurden bei der Suche nach allen Vorkommen einer Zeichenfolge der Länge 4 bzw. 8 in einem String der Länge 10 MB bzw. 100 MB gemessen. Man sieht

- dass sich die Länge des gesuchten Strings auf die Laufzeit auswirken kann
- dass die Boyer-Moore Varianten schneller oder langsamer sein können
- dass eine parallele Version (siehe Abschnitt 15.10) von *search* langsamer sein kann
- dass die *string*-Elementfunktion *find* (von der es keine parallele Variante gibt) schneller ist als die vielseitigeren *search*-Funktionen, die für beliebige Container verfügbar sind.

| Benchmarks Visual Studio<br>2019.5 x64 /O2 Release | string 10MB |            | string 100 MB |           |
|----------------------------------------------------|-------------|------------|---------------|-----------|
|                                                    | 4 Zeichen   | 8 Zeichen  | 4 Zeichen     | 8 Zeichen |
| 1. string.find all                                 | 0,010 Sek.  | 0,013 Sek. | 0,11 Sek.     | 0,13 Sek. |
| stringview findall                                 | 0,010 Sek.  | 0,013 Sek. | 0,11 Sek.     | 0,13 Sek. |
| 2. search                                          | 0,021 Sek.  | 0,022 Sek. | 0,19 Sek.     | 0,22 Sek. |
| search(seq                                         | 0,03 Sek.   | 0,04 Sek.  | 0,30 Sek.     | 0,40 Sek. |
| search(par                                         | 1,00 Sek.   | 1,00 Sek.  | 9,0 Sek.      | 10,5 Sek. |
| 3. search(BoyerMoore                               |             |            |               |           |
| BoyerMoore::Default                                | 0,012 Sek.  | 0,015 Sek. | 0,14 Sek.     | 0,16 Sek. |
| BoyerMoore::BoyerMoore                             | 0,3 Sek.    | 0,3 Sek.   | 2,8 Sek.      | 2,9 Sek.  |
| BoyerMoore::Horspool                               | 0,2 Sek.    | 0,2 Sek.   | 2,1 Sek.      | 2,2 Sek.  |

### 15.2.5 Minimum und Maximum

Mit *min* und *max* erhält man das **Minimum** bzw. **Maximum** von zwei Werten:

```
template<class T>
constexpr const T& min(const T& a, const T& b); // analog mit max

template<class T, class Compare>
constexpr const T& min(const T& a, const T& b, Compare comp); // analog mit max
```

Das Argument kann auch eine Initialisierungsliste sein:

```
template<class T>
constexpr T min(initializer_list<T> t); // analog mit max

template<class T, class Compare>
constexpr T min(initializer_list<T> t, Compare comp); // analog mit max
```

Die mit *constexpr* gekennzeichneten Algorithmen bestimmen den Wert schon während der Kompilation, wenn die Argumente schon während der Kompilation bekannt sind.

Beispiel: Da der Rückgabetyt *constexpr* ist, kann er einem *constexpr* zugewiesen werden.

```
constexpr int min1 = std::min(1,2);
constexpr int min2 = std::min({ 1,2,3 });
```

Der Aufruf von *min* oder *max* kann allerdings zu einem Fehler durch ein Makro führen

```
int m1 = std::max(3, 4);
using std::max;
int m2 = max(3, 4);
```

|| #define max(a, b) (((a) > (b)) ? (a) : (b))  
Wird erweitert auf: (((3) > (4)) ? (3) : (4))

wenn zuvor die Header-Datei *minwindef.h* inkludiert wurde. Diese Datei wird meist indirekt über ein *#include <windef.h>* eingebunden. Diesen Fehler kann man unterbinden durch

```
#undef max
```

Die Algorithmen ***min\_element*** bzw. ***max\_element*** geben einen Iterator auf den minimalen bzw. maximalen Wert im Bereich *[first, last)* zurück. ***max\_element*** hat dieselben Parameter und denselben Rückgabetyptyp wie ***min\_element***:

```
template<class ForwardIterator>
constexpr ForwardIterator min_element(ForwardIterator first, ForwardIterator last);

template<class ForwardIterator, class Compare>
constexpr ForwardIterator min_element(ForwardIterator first, ForwardIterator last,
Compare comp);
```

Mit ***minmax\_element*** erhält man das Minimum und das Maximum mit einem einzigen Aufruf (als Wertepaar):

```
template<class ForwardIterator>
pair<ForwardIterator, ForwardIterator>
minmax_element(ForwardIterator first, ForwardIterator last);

template<class ForwardIterator, class Compare>
pair<ForwardIterator, ForwardIterator>
minmax_element(ForwardIterator first, ForwardIterator last, Compare comp);
```

### 15.2.6 Mit ***all\_of***, ***any\_of***, ***none\_of*** alle Elemente in einem Bereich prüfen

Die Algorithmen `template <class InputIterator, class Predicate>`

```
bool all_of(InputIterator first, InputIterator last, Predicate pred);
```

```
template <class InputIterator, class Predicate>
```

```
bool any_of(InputIterator first, InputIterator last, Predicate pred);
```

```
template <class InputIterator, class Predicate>
```

```
bool none_of(InputIterator first, InputIterator last, Predicate pred);
```

geben *true* zurück, wenn für alle Elemente (bzw. mindestens ein Element bzw. kein Element) im Bereich *[first, last)* das Prädikat erfüllt bzw. nicht erfüllt ist.

```
Beispiel: std::vector<int> v = { 1,2,3,7 };
auto gerade = [](int i) { return i % 2 == 0; };
auto positiv = [](int i) { return i > 0; };
auto null = [](int i) { return i == 0; };

bool alle_gerade = std::all_of(v.cbegin(), v.cend(), gerade);
// false
bool eines_positiv = std::any_of(v.cbegin(), v.cend(),
                                positiv); // true
bool keines_null = std::none_of(v.cbegin(), v.cend(), null);
// true
```



## 15.3 Kopieren und Verschieben von Bereichen

*copy* kopiert die Elemente im Bereich  $[first, last)$  in den Bereich ab *result*. Falls der Datentyp der Elemente eine Klasse ist, werden diese elementweise kopiert:

```
template <class InputIterator, class OutputIterator>
OutputIterator copy(InputIterator first,
    InputIterator last, OutputIterator result)
{
    while (first != last) *result++ = *first++;
    return result;
}
```

Elemente eines elementaren Datentyps werden dagegen als Block kopiert:

```
memmove(result, first, last - first); // C-Funktion, kopiert
```

Wie diese Anweisungen zeigen, werden dabei die Elemente im Bereich ab *result* überschrieben. Deshalb muss ab *result* bereits Platz reserviert sein oder ein Einfügeiterator verwendet werden.

*copy\_if* kopiert alle Elemente, für die das Prädikat *true* ist:

```
template<class InputIterator, class OutputIterator, class Predicate>
OutputIterator copy_if(InputIterator first, InputIterator last, OutputIterator result,
    Predicate pred);
```

*copy\_backward* kopiert die Elemente im Bereich  $[first, last)$  in den Bereich, der mit *result* endet. *copy* und *copy\_backward* unterscheiden sich nicht im Ergebnis, sondern nur in der Reihenfolge, in der die Elemente kopiert werden.

```
template <class BidirectionalIterator1, class
    BidirectionalIterator2>
BidirectionalIterator2 copy_backward(BidirectionalIterator1 first,
    BidirectionalIterator1 last, BidirectionalIterator2 result)
{
    while (first != last) *--result = *--last;
    return result;
}
```

Bei beiden Algorithmen darf *result* nicht im Bereich  $[first, last)$  enthalten sein. Falls sich der Quellbereich und der Zielbereich überlappen und der Quellbereich vor dem Zielbereich liegt, muss *copy* verwendet werden. Wenn der Quellbereich hinter dem Zielbereich liegt, muss *copy\_backward* verwendet werden.

Die folgenden Beispiele verwenden die Container

```
string s = "abc", s1 = "12345", s2 = s1, s3;
vector<char> v;
```

1. Diese beiden Aufrufe überschreiben die Elemente im Zielbereich:

```
std::copy(s.begin(), s.end(), s1.begin()); // s1="abc45"
std::copy_backward(s.begin(), s.end(), s2.end()); //s2="12abc"
```

2. Falls die kopierten Elemente in den Zielbereich eingefügt werden sollen, verwendet man einen Einfügeiterator:

```
std::copy(s.begin(), s.end(), back_inserter(s3)); // s3="abc"
```

3. Mit einem Stream-Iterator (siehe Abschnitt 15.1.4) können die kopierten Elemente in eine Datei geschrieben werden:

```
#include <fstream>
std::fstream f("c:\\test\\outit.txt");
std::copy(s.begin(), s.end(), std::ostream_iterator<char>(f, " "));
```

4. Die beiden Bereiche können aus verschiedenen Containern sein. Deswegen kann ein Array in einen Container der Standardbibliothek kopiert werden oder ein Array auf ein anderes:

```
char a[5] = "xyz", b[10]; string c = "abcdef";
std::copy(a, a + 4, c.begin()); // c="xyz";
std::copy(a, a + 4, b);         // b="xyz";
```

Die *move*-Algorithmen verschieben die Elemente. Damit können Container mit Elementen verschoben werden, die nicht kopierbar sind. Das muss aber nicht bedeuten, dass die Elemente aus dem Quellbereich entfernt werden:

```
template<class InputIterator, class OutputIterator>
OutputIterator move(InputIterator first, InputIterator last, OutputIterator result);

template<class BidirectionalIterator1, class BidirectionalIterator2>
BidirectionalIterator2 move_backward(BidirectionalIterator1 first,
                                       BidirectionalIterator1 last, BidirectionalIterator2 result);
```

Beispiel: Mit den *move*-Algorithmen können Container mit Elementen verschoben werden, die nicht kopierbar sind:

```
std::vector<std::thread> v;
std::list<std::thread> l;
std::move(v.begin(), v.end(), std::back_inserter(l));
// copy wird nicht kompiliert, da thread nicht kopierbar ist
```

## 15.4 Elemente transformieren und ersetzen

Die Algorithmen *transform* sind ähnlich aufgebaut wie *copy*. Der einzige Unterschied zwischen den beiden ist der, dass bei *transform* das Ergebnis einer Operation in den Bereich geschrieben wird, auf den der *result*-Iterator zeigt:

```
template<class InputIterator, class OutputIterator, class UnaryOperation>
OutputIterator transform(InputIterator first, InputIterator last,
OutputIterator result, UnaryOperation op);
```

Beispiel: Durch *transform* wird für jeden Wert *i* aus *v* ein Wertepaar (*i*,*i*\**i*) in den Vektor *result* eingefügt:

```
std::vector<int> v = { 1, 3, 7 };
std::vector<std::pair<int, double>> results;
std::transform(v.begin(), v.end(), back_inserter(results),
    [](int i) { return std::make_pair(i, i*i); });
// result = { {1,1}, {3,9}, {7,49} }
```

Eine zweite Variante führt für die Elemente der beiden Bereiche *first1* .. *last1* und *first2* .. *last2* eine binäre Operation aus und schreibt ihr Ergebnis in den Bereich ab *result*:

```
template <class InputIterator1, class InputIterator2,
class OutputIterator, class BinaryOperation>
OutputIterator transform(InputIterator1 first1,
    InputIterator1 last1, InputIterator2 first2,
    OutputIterator result, BinaryOperation binary_op)
{
    while (first1 != last1)
        *result++ = binary_op(*first1++, *first2++);
    return result;
}
```

*replace* ersetzt jedes Element im Bereich [*first*, *last*), das den Wert *old\_value* hat, durch den Wert *new\_value*:

```
template <class ForwardIterator, class T>
void replace(ForwardIterator first, ForwardIterator last,
    const T& old_value, const T& new_value)
{
    while (first != last)
    {
        if (*first == old_value) *first = new_value;
        ++first;
    }
}
```

*replace\_if* ersetzt die Werte, für die das Prädikat *pred* den Wert *true* hat:

```

template <class ForwardIterator, class Predicate, class T>
void replace_if(ForwardIterator first, ForwardIterator
    last, Predicate pred, const T& new_value)
{
    while (first != last)
    {
        if (pred(*first)) *first = new_value;
        ++first;
    }
}

```

Die *replace*-Algorithmen mit *copy* im Namen

```

template<class InputIterator, class OutputIterator, class T>
OutputIterator replace_copy (InputIterator first, InputIterator last,
    OutputIterator result, const T& old_value, const T& new_value);

template<class Iterator, class OutputIterator, class Predicate, class T>
OutputIterator replace_copy_if (Iterator first, Iterator last,
    OutputIterator result, Predicate pred, const T& new_value);

```

verändern die Werte im Bereich  $[first, last)$  nicht, sondern schreiben die Werte, die man mit dem entsprechenden Algorithmus ohne *copy* erhalten würde, in den Bereich ab *result*. Der Funktionswert ist wie bei allen Algorithmen mit *copy* im Namen ein Zeiger auf das letzte Element, also  $result + last - first$ .

Beispiel: 

```
string s1 = "12345", s2 = s1, s3 = s1, s5 = s1, s4, s6;
replace(s1.begin(), s1.end(), '2', 'b'); // s1="1b345"
replace_if(s2.begin(), s2.end(),
    [](char c) {return c > '2'; }, 'b'); //s2="12bbb";
replace_copy(s1.begin(), s1.end(), back_inserter(s4), '2',
    'b'); // s4="1b345";
replace_copy_if(s5.begin(), s5.end(), back_inserter(s6),
    [](char c) {return c > '2'; }, 'b'); //s6="12bbb";
```

Die *replace*-Funktionen mit *copy* im Namen benötigen nur InputIteratoren und können deswegen im Unterschied zu den anderen *replace*-Funktionen auch mit Stream-Iteratoren aufgerufen werden.

## 15.5 Elementen in einem Bereich Werte zuweisen Θ

Die praktische Bedeutung der folgenden Algorithmen ist gering: *fill* und *fill\_n* weisen allen Elementen in einem Bereich denselben Wert zu, und *iota* weist aufeinanderfolgende Werte zu. *generate* und *generate\_n* sind flexibler, aber eine Schleife (z.B. eine bereichsbasierte *for*-Schleife) ist oft einfacher.

*fill* weist allen Elementen im Bereich  $[first, last)$  den Wert *value* zu:

```
template<class ForwardIterator, class T>
void fill(ForwardIterator first, ForwardIterator last, const T& value);
```

**fill\_n** weist *n* Elementen ab der Position *first* den Wert *value* zu:

```
template<class OutputIterator, class Size, class T>
void fill_n(OutputIterator first, Size n, const T& value);
```

**generate** weist allen Elementen im Bereich [*first*, *last*) einen von einem Funktionsobjekt oder einer Funktion *gen* erzeugten Wert zu.

```
template<class ForwardIterator, class Generator>
void generate(ForwardIterator first, ForwardIterator last, Generator gen);
```

**generate\_n** weist *n* Elementen ab *first* den von *gen* erzeugten Wert zu:

```
template<class OutputIterator, class Size, class Generator>
void generate_n(OutputIterator first, Size n, Generator gen);
```

Beispiel: Mit

```
std::vector<int> v(100); // 100 Elemente einfügen
std::minstd_rand rnd(std::time(0)); // #include <random>
```

entspricht das Ergebnis von

```
std::generate(v.begin(), v.end(), [] { return rnd(); });
```

dem von

```
for (auto& i : v)
    i = rnd();
```

Da man mit *fill* allen Elementen nur denselben Wert zuweisen kann,

```
std::vector<int> v3(100);
fill(v3.begin(), v3.end(), 17);
```

erhält man bei einem *vector* mit dem Konstruktor mit zwei Parametern denselben Effekt.

```
std::vector<int> v2(100,17);
```

Der nach

```
#include <numeric>
```

im Namensbereich *std* verfügbare Algorithmus *iota* füllt einen Bereich mit aufeinanderfolgenden Werten, die mit dem Argument für *value* beginnen. Der Name kommt von einer Funktion der Programmiersprache APL.

```
template <class ForwardIterator, class T>
void iota(ForwardIterator first, ForwardIterator last, T value);
```

Beispiel: Einen Vektor kann man mit aufeinanderfolgenden Werten füllen:

```
vector<int> v(5); // Ein Vektor mit 5 Elementen
std::iota(v.begin(), v.end(), 3); // v={3, 4, 5, 6, 7}
```

## 15.6 Elemente entfernen – das *erase-remove* Idiom

Alle Container der STL haben Elementfunktionen mit dem Namen *erase*, die ein Element oder alle Elemente aus einem zusammenhängenden Bereich

```
iterator erase(const_iterator position);
iterator erase(const_iterator first, const_iterator last);
```

aus dem Container entfernen.

Bei der Verwendung von *erase* muss man allerdings beachten, dass **Iteratoren** bei den meisten Containern **ungültig** werden können. Deshalb darf man nicht vergessen, diesen einen gültigen Wert zuzuweisen. Das ist oft der Rückgabewert von *erase*.

Beispiel: Die Zuweisung an den Iterator in einer Schleife wird oft vergessen, was zu einem ungültigen Iterator und zu einem Programmabbruch führen kann. Anstatt

```
vector<int> v = { 1,17,3,4,17,6,7 };
for (auto i = v.begin(); i != v.end(); i++)
{
    if (*i == 17)
        v.erase(i); // i ungültig, Programmabbruch
}
```

sollten Anweisungen wie diese verwendet werden:

```
auto i = v.begin();
while (i != v.end())
{
    if (*i == 17)
        i = v.erase(i); // kein Programmabbruch
    else i++;
} // v = { 1,3,4,6,7 };
```

Falls Elemente aus einem Container entfernt werden sollen, die eine bestimmte Bedingung erfüllen, führt das bei manchen Containern (z.B. einem *vector*) dazu, dass bei jedem Aufruf von *erase* alle Elemente nach dem entfernten nach vorne verschoben werden müssen. Diese **vielen Aufrufe** von *erase* (mit den eventuell damit verbundenen Verschiebungen) kann man mit den *remove*-Algorithmen

```
template<class ForwardIterator, class T>
ForwardIterator remove(ForwardIterator first, ForwardIterator last, const T& value);

template<class ForwardIterator, class Predicate>
ForwardIterator remove_if(ForwardIterator first, ForwardIterator last,
    Predicate pred);
```

auf **einen einzigen Aufruf** reduzieren. Die Namen dieser Algorithmen sind etwas irreführend, da sie in Wirklichkeit keine Elemente entfernen, sondern die Elemente nur so umordnen, dass diese danach in einem zusammenhängenden Bereich sind. Der Rückgabewert ist ein Iterator, der dann auf den Anfang dieses Bereichs zeigt. Die Elemente in diesem Bereich können dann mit einem einzigen Aufruf von

```
erase(remove(...),v.end());
```

entfernt werden. Der Aufruf von *remove* ist nicht nur schneller als viele Aufrufe von *erase*, sondern er vermeidet auch Probleme aufgrund von ungültigen Iteratoren.

Beispiel: Aus

```
vector<int> v0 = {1,17,3,4,17,6,7}, v=v0, w=v0;
```

werden durch die nächsten Anweisungen alle Elemente mit dem Wert 17 entfernt, bzw. alle Werte die größer als 5 sind:

```
v.erase(remove(v.begin(), v.end(), 17), v.end());
// v = { 1,3,4,6,7 }

w.erase(remove_if(w.begin(), w.end(),
    [](int x) { return x > 5; }), w.end());
// v = { 1,3,4 }
```

Diese Kombination der *erase*-Elementfunktionen und der *remove*-Algorithmen wird als **erase-remove Idiom** bezeichnet. Es ist generell empfehlenswert, alle Elemente, die eine bestimmte Bedingung erfüllen, auf diese Art aus einem Container zu entfernen.

Die *remove*-Algorithmen der STL können auch mit einem Array aufgerufen werden. Allerdings kann man aus einem Array keine Elemente entfernen.

**unique** ordnet unmittelbar aufeinander folgende gleiche Elemente im Bereich *[first, last)* an das Ende dieses Bereichs um. Aus einem sortierten Container können so alle Duplikate entfernt werden. In der Variante mit einem binären Prädikat werden aufeinanderfolgende Elemente, für die das Prädikat *true* ist, ungeordnet:

```
template<class ForwardIterator>
ForwardIterator unique(ForwardIterator first, ForwardIterator last);

template<class ForwardIterator, class BinaryPredicate>
ForwardIterator unique(ForwardIterator first, ForwardIterator last,
    BinaryPredicate pred);
```

Beispiel: Die auf den Rückgabewert von *unique* folgenden Werte sind undefiniert:

```
string s="  Viele aufffeinander folgende      Leerzeichen";
auto p = std::unique(s.begin(), s.end());
// s = "  Viele aufeinander folgende Leerzeicheneerzeichen"
```

Kopiert man die Werte bis zu p, erhält man die Werte ohne Duplikate:

```
string t(s.begin(), p);
// t = "  Viele aufeinander folgende Leerzeichen"
```

Mit einem binären Prädikat:

```
auto p = std::unique(s.begin(), s.end(),
    [](char c1, char c2) { return c1 == ' ' && c2 == ' '; });
string t(s.begin(), p);
// t = "  Viele aufffeinander folgende Leerzeichen"
```

Auch von den *remove*- und *unique*-Algorithmen gibt es Varianten mit *copy* im Namen (siehe auch Seite 795). Sie kopieren die Werte, die man in der Version ohne *copy* erhalten würde, in den Bereich ab *result*. Der Funktionswert ist *result* + *last* – *first*.

```
template<class InputIterator, class OutputIterator, class T>
OutputIterator remove_copy(InputIterator first, InputIterator last,
    OutputIterator result, const T& value);
```

```
template<class InputIterator, class OutputIterator>
OutputIterator unique_copy(InputIterator first,
    InputIterator last, OutputIterator result);
```

Diese Algorithmen gibt es auch noch in Varianten mit Prädikaten.

Beispiel: Mit dem String aus dem letzten Beispiel erhält man

```
std::string t;
std::unique_copy(s.begin(), s.end(), std::back_inserter(t),
    [](char c1, char c2) { return c1 == ' ' && c2 == ' '; });
// s= "  Viele aufffeinander folgende      Leerzeichen";
// t = "  Viele aufffeinander folgende Leerzeichen"
```

## 15.7 Die Reihenfolge von Elementen vertauschen

### 15.7.1 Elemente vertauschen

*swap* vertauscht die Werte der beiden als Argument übergebenen Variablen. Im Unterschied zu den meisten anderen Algorithmen der STL arbeitet *swap* nicht mit Elementen aus einem Bereich, sondern mit einzelnen Variablen.



```
template<class T> void swap(T& a, T& b);
```

Viele Klassen der STL haben Spezialisierungen für *swap*, die auf die jeweilige Klasse abgestimmt und optimiert sind.

**swap\_ranges** vertauscht die Werte des Bereichs  $[first1, last1)$  mit denen im Bereich  $[first2, first2+last1-first1)$ :

```
template<class ForwardIterator1, class ForwardIterator2>
ForwardIterator2 swap_ranges(ForwardIterator1 first1,
ForwardIterator1 last1, ForwardIterator2 first2);
```

Beispiel: 

```
vector<string> s = { "Senf", "-", "Hugo" };
deque<string> a = { "Der", "Jazz", "Messenger" };
swap_ranges(s.begin(), s.begin() + 2, a.begin() + 1);
// s={ "Jazz", "Messenger", "Hugo" };
```

### 15.7.2 Permutationen $\Theta$

Die Algorithmen

```
template <class BidirectionalIterator>
bool next_permutation (BidirectionalIterator first, BidirectionalIterator last);

template <class BidirectionalIterator, class Compare>
bool next_permutation(BidirectionalIterator first, BidirectionalIterator last,
Compare comp);
```

erzeugen eine Permutation der Elemente des Bereichs  $[first, last)$ . Dabei wird in der ersten der Operator  $<$  zur Bestimmung des nächsten Elements verwendet und in der zweiten die Funktion *comp*. Der Funktionswert zeigt an, ob es noch weitere Permutationen gibt.

Die verschiedenen Permutationen entsprechen den verschiedenen lexikografischen Anordnungen der Elemente. Mit *next\_permutation* erhält man die nächste Anordnung und mit *prev\_permutation* die vorherige:

```
template <class BidirectionalIterator>
bool prev_permutation(BidirectionalIterator first, BidirectionalIterator last);

template <class BidirectionalIterator, class Compare>
bool prev_permutation(BidirectionalIterator first, BidirectionalIterator last,
Compare comp);
```

Beispiel: Durch

```
std::vector<string> s = { "Contessa", "Laura", "spielt" };
cout << s[0] << " " << s[1] << " " << s[2] << endl;
while (next_permutation(s.begin(), s.end()))
    cout << s[0] << " " << s[1] << " " << s[2] << endl;
```

werden alle Permutationen der Elemente von *s* ausgegeben:

|                       |                       |
|-----------------------|-----------------------|
| Contessa Laura spielt | Laura spielt Contessa |
| Contessa spielt Laura | spielt Contessa Laura |
| Laura Contessa spielt | spielt Laura Contessa |

Mit diesen Funktionen kann man insbesondere eine Funktion für alle Permutationen von Argumenten aufrufen.

Beispiel: Mit

```
void test_sort(std::vector<int> p)
{
    for (const auto& i : p)
        cout << i << " ";
    cout << " sortiert: ";
    std::sort(p.begin(), p.end());
    for (const auto& i : p)
        cout << i << " "; // #include <iomanip> für boolalpha
    cout << " is_sorted: " << std::boolalpha <<
        std::is_sorted(p.begin(), p.end()) << endl;
}
```

und

```
std::vector<int> p = { 1,2,3 };
test_sort(p);
while (next_permutation(p.begin(), p.end()))
    test_sort(p);
```

kann man prüfen, ob *sort* tatsächlich alle Reihenfolgen eines Containers richtig sortiert.

|   |   |   |             |   |   |                 |
|---|---|---|-------------|---|---|-----------------|
| 1 | 2 | 3 | sortiert: 1 | 2 | 3 | is_sorted: true |
| 1 | 3 | 2 | sortiert: 1 | 2 | 3 | is_sorted: true |
| 2 | 1 | 3 | sortiert: 1 | 2 | 3 | is_sorted: true |
| 2 | 3 | 1 | sortiert: 1 | 2 | 3 | is_sorted: true |
| 3 | 1 | 2 | sortiert: 1 | 2 | 3 | is_sorted: true |
| 3 | 2 | 1 | sortiert: 1 | 2 | 3 | is_sorted: true |

### 15.7.3 Die Reihenfolge umkehren und Elemente rotieren $\Theta$

**reverse** kehrt die Reihenfolge der Elemente im Bereich  $[first, last)$  um:

```
template<class BidirectionalIterator>
void reverse(BidirectionalIterator first, BidirectionalIterator last);
```

Beispiel: `string s = "1234567";`  
`std::reverse(s.begin() + 1, s.end() - 2); // s="1543267"`

**rotate** rotiert die Elemente im Bereich  $[first, last)$  so, dass das Element, auf das *middle* zeigt, anschließend das erste Element ist:

```
template<class ForwardIterator>
void rotate(ForwardIterator first, ForwardIterator middle, ForwardIterator last);
```

Beispiel: `string s = "1234567";`  
`string::iterator p = find(s.begin(), s.end(), '3');`  
`rotate(s.begin(), p, s.end()); // s="3456712"`

Auch von diesen Algorithmen gibt es Varianten mit **copy** im Namen (siehe auch Seite 795). Sie kopieren die Werte, die man in der Version ohne *copy* erhalten würde, in den Bereich ab *result*. Der Funktionswert ist *result + last – first*.

```
template<class BidirectionalIterator, class OutputIterator>
OutputIterator reverse_copy(BidirectionalIterator first,
    BidirectionalIterator last, OutputIterator result);

template<class ForwardIterator, class OutputIterator>
OutputIterator rotate_copy(ForwardIterator first, ForwardIterator middle,
    ForwardIterator last, OutputIterator result);
```

#### 15.7.4 Elemente durcheinander mischen Θ

Mit **shuffle** können die Elemente eines Bereichs durchmischt (permutiert) werden, so dass jede mögliche Permutation dieselbe Wahrscheinlichkeit hat, dass sie das Ergebnis ist. Dazu muss ein Zufallszahlengenerator übergeben werden:

```
template<class RandomAccessIterator, class UniformRandomNumberGenerator>
void shuffle(RandomAccessIterator first, RandomAccessIterator last,
    UniformRandomNumberGenerator&& g);
```

Beispiel: `vector<int> v = { 1,7,9 };`  
`std::random_device rd;`  
`std::mt19937 g(rd());`  
`std::shuffle(v.begin(), v.end(), g);`  
`// z.B. v = { 7,1,9 };`

## 15.8 Algorithmen zum Sortieren und für sortierte Bereiche

Sortierte Bereiche sind oft die Grundlage für besonders schnelle Algorithmen.

### 15.8.1 Partitionen Θ

Die *partition*-Algorithmen sind eine Grundlage des Quicksort-Algorithmus. Sie werden vor allem von den *sort*-Algorithmen benötigt. Für eigene Algorithmen benötigt man sie eher selten.

***partition*** vertauscht die Position der Elemente so, dass diejenigen am Anfang kommen, für die das Prädikat *pred* den Wert *true* hat, und alle anderen anschließend. Bezeichnet man den Bereich, für den das Prädikat gilt, mit *[first, middle)* und den Bereich, für den es nicht gilt, mit *[middle, last)*, dann ist der Funktionswert der Wert *middle*.

```
template<class BidirectionalIterator, class Predicate>
BidirectionalIterator partition(BidirectionalIterator first,
    BidirectionalIterator last, Predicate pred);
```

***stable\_partition*** vertauscht die Elemente ebenfalls so, dass das bei *partition* angegebene Kriterium erfüllt ist. Der Unterschied zwischen den beiden besteht lediglich darin, dass *stable\_partition* die ursprüngliche Anordnung der Elemente erhält, für die *pred* gilt bzw. nicht gilt.

```
template<class BidirectionalIterator, class Predicate>
BidirectionalIterator stable_partition(BidirectionalIterator first,
    BidirectionalIterator last, Predicate pred);
```

Beispiel: Nach

```
string s1 = "1544256", s2 = s1;
auto pred = [](char x) {return x < '4'; };
partition(s1.begin(), s1.end(), pred); // s1=1244556
stable_partition(s2.begin(), s2.end(), pred); // s2=1254456
```

kommen alle Zeichen, die vor '4' kommen (also '4' und '4') vor allen Zeichen, die danach kommen. In *s2* ist die ursprüngliche Reihenfolge erhalten.

***partition\_copy*** kopiert die Elemente aus dem Bereich *[first,last)* in Abhängigkeit vom Wert des Prädikats in zwei verschiedene Bereiche.

```
template <class InputIterator, class OutputIterator1, class OutputIterator2, class
    Predicate>
pair<OutputIterator1, OutputIterator2> partition_copy(InputIterator first, InputIterator
    last, OutputIterator1 out_true, OutputIterator2 out_false, Predicate pred);
```

***is\_partitioned*** gibt *true* zurück, wenn alle Elemente, die das Prädikat erfüllen, vor den Elementen kommen, die es nicht erfüllen.

```
template <class InputIterator, class Predicate>
bool is_partitioned(InputIterator first, InputIterator last, Predicate pred);
```

## 15.8.2 Bereiche sortieren

***sort*** und ***stable\_sort*** sortieren die Elemente im Bereich *[first,last)* mit einer als Introsort bezeichneten Variante des Quicksort:

```
template<class RandomAccessIterator>
void sort(RandomAccessIterator first, RandomAccessIterator last);
```

Seit C++17 gibt es parallele Überladungen, bei denen Teilaufgaben auf verschiedene Threads verteilt werden. Diese sind deutlich schneller und werden in Abschnitt 15.10.1 vorgestellt.

Von jeder dieser Funktionen gibt es zwei Versionen: In der ersten ohne den Parameter *Compare* werden zwei Elemente mit dem Operator < verglichen. In der zweiten Version

```
template<class RandomAccessIterator, class Compare>
void sort(RandomAccessIterator first, RandomAccessIterator last, Compare comp);
```

kann für den Parameter *comp* eine Funktion (meist ein Lambda-Ausdruck) eingesetzt werden, die mit zwei Argumenten aufgerufen werden kann und einen booleschen Wert liefert. Gibt *comp(x,y)* den Wert *true* zurück, kommt x vor y. Mit dem vordefinierten Funktionsobjekt *greater* wird der Bereich dann mit dem Operator > sortiert. *comp* muss die Anforderungen an eine „strict weak ordering“ erfüllen (siehe unten).

Beispiel: Der Container

```
std::vector<int> v = { 5, 7, 7, 2, 8};
```

wird durch

```
std::sort(v.begin(), v.end()); // 1.
std::sort(v.begin(), v.end(), std::greater<int>()); // 2.
std::sort(v.begin(), v.end(), // 3.
    [](int a, int b) { return b < a; });
```

sortiert.

1. Mit dem <-Operator der Elemente. Ergebnis *v* = { 2, 5, 7, 7, 8}.
2. Mit dem >-Operator der Elemente. Ergebnis *v* = { 8, 7, 7, 5, 2}.
3. Mit dem Lambda-Ausdruck, wie *a>b*. Ergebnis *v* = { 8, 7, 7, 5, 2}.

Um ein Array *a* mit 5 Elementen zu sortieren, muss man *v.begin()* durch *a* und *v.end()* durch *a+5* ersetzen:

```
int a[5] = { 5, 7, 7, 2, 8 };
std::sort(a, a + 5); // { 2, 5, 7, 7, 8}
```

Falls man Strings des Datentyps *char\** mit der Funktion *strcmp* sortieren will, ist das mit einem Prädikat wie *comp* möglich:

```
bool comp(const char* s1, const char* s2)
{
    return strcmp(s1, s2)<0;
}
```

Die Komplexität der *sort*-Funktionen ist mit *n* zu sortierenden Elementen seit C++11 *n\*log(n)*. Vor C++11 konnte sie in ungünstigen Fällen auch *n\*n* sein.

Nach einem Sortieren mit *sort* kann die Reihenfolge von Werten mit demselben Vergleichswert anders sein als die ursprüngliche Reihenfolge. Das ist bei Daten, die zu einem

Sortierbegriff gehören, oft nicht erwünscht (z.B. ist nach einem Sortieren von Personen nach dem Alter die Reihenfolge der gleichaltrigen anders als vorher). Falls die Anordnung gleicher Werte erhalten bleiben soll, muss man *stable\_sort* verwenden:

```
template<class RandomAccessIterator>
void stable_sort(RandomAccessIterator first, RandomAccessIterator last);

template<class RandomAccessIterator, class Compare>
void stable_sort(RandomAccessIterator first, RandomAccessIterator last,
    Compare comp);
```

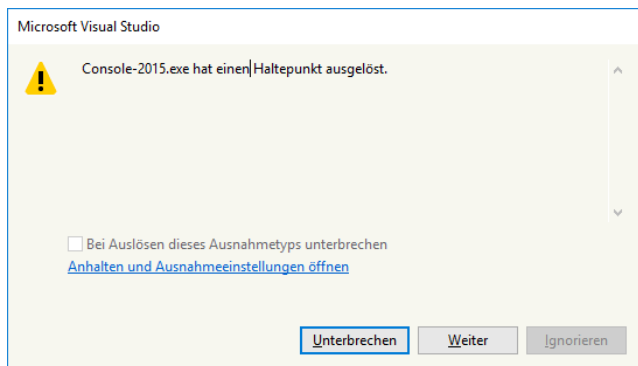
Die Komplexität von *stable\_sort* ist seit C++11 dieselbe wie die von *sort*, wenn Platz für einen temporären Puffer verfügbar ist, der genauso groß ist wie der für die zu sortierenden Daten. Falls dieser Speicher nicht verfügbar ist, ist die Komplexität  $n \cdot \log(n) \cdot \log(n)$ . Vor C++11 war die Komplexität  $n \cdot \log(n) \cdot \log(n)$  und damit geringer als der ungünstige Wert  $n \cdot n$  bei *sort*. Deswegen wurde *stable\_sort* vor C++11 oft verwendet, um diesen ungünstigen Fall zu vermeiden.

Alle diese Algorithmen benötigen RandomAccess-Iteratoren. Da der Container *list* und die assoziativen Container nur bidirektionale Iteratoren haben, können sie nicht mit *sort* oder *stable\_sort* sortiert werden. Beim Container *list* steht dafür eine Elementfunktion *sort* zur Verfügung. Die assoziativen Container sortieren ihre Elemente immer automatisch.

Das Argument für den Parameter *comp* muss die folgenden Anforderungen erfüllen, die im C++-Standard als „**strict weak ordering**“ („strenge schwache Ordnung“) bezeichnet werden:

- $\text{comp}(x,x) == \text{false}$  für alle  $x$  (d.h. *comp* ist irreflexiv).
- aus  $\text{comp}(a,b)$  und  $\text{comp}(b,c)$  folgt  $\text{comp}(a,c)$  (d.h. *comp* ist transitiv).
- Definiert man  $\text{equiv}(a,b)$  durch  $!(\text{comp}(a,b) \ \&\& \ \text{comp}(b,a))$ , muss *equiv* transitiv sein, d.h. aus  $\text{equiv}(a,b)$  und  $\text{equiv}(b,c)$  folgt  $\text{equiv}(a,c)$

Falls diese Voraussetzungen nicht erfüllt sind, kann das Ergebnis von *sort* eine falsche Sortierfolge sein. Oft erkennt der *sort*-Algorithmus auch, dass sie nicht erfüllt sind und gibt zur Laufzeit eine Fehlermeldung aus:



Beispiel: Wegen a) wird durch die Operatoren `<=` oder `>=` bzw. Vergleichsfunktionen wie

```
bool GroesserGleich(int a, int b)
{
    return a >= b;
}
```

keine strenge schwache Ordnung definiert. Übergibt man diese Funktion als Argument an *sort*, erhält man bei einer Debug-Konfiguration eine Meldung wie oben.

Die Operatoren `<` oder `>` bzw. Funktionen wie *greater* erfüllen dagegen die Anforderungen an eine strenge schwache Ordnung. Die Voraussetzung c) sieht schlimmer aus als sie ist. Sie entspricht bei den arithmetischen Datentypen der Gleichheit:

$$\text{equiv}(a,b) = (! (a < b)) \ \&\& \ (! (b < a)) = (a >= b) \ \&\& \ (b >= a) = a == b$$

*partial\_sort* platziert die ersten (*middle-first*) sortierten Elemente des Bereichs *[first, last)* in den Bereich *[first, middle)*. Die Reihenfolge der übrigen Elemente ist undefiniert:

```
template<class RandomAccessIterator>
void partial_sort(RandomAccessIterator first, RandomAccessIterator middle,
    RandomAccessIterator last); // eine weitere Version mit Compare
```

Mit *partial\_sort\_copy* wird der sortierte Bereich *[first, last)* in den Bereich *[result\_first, result\_last)* kopiert.

```
template<class InputIterator, class RandomAccessIterator>
RandomAccessIterator partial_sort_copy(InputIterator first,
    InputIterator last, RandomAccessIterator result_first,
    RandomAccessIterator result_last); // eine weitere Version mit Compare
```

Beispiel: `string s1 = "1523467";`  
`partial_sort(s1.begin(), s1.begin() + 3, s1.end());`  
`// s1="123xxxx", hier steht x für einen undefinierten Wert`

Die *is\_sorted*-Algorithmen geben *true* zurück, wenn die Elemente im Bereich *[first,last)* sortiert sind:

```
template<class ForwardIterator>
bool is_sorted(ForwardIterator first, ForwardIterator last);

template<class ForwardIterator, class Compare>
bool is_sorted(ForwardIterator first, ForwardIterator last, Compare comp);

template<class ForwardIterator>
ForwardIterator is_sorted_until(ForwardIterator first, ForwardIterator last);

template<class ForwardIterator, class Compare>
```

*ForwardIterator* **is\_sorted\_until**(*ForwardIterator first, ForwardIterator last, Compare comp*);

**nth\_element** ordnet die Elemente im Bereich  $[first, last)$  so um, dass sich das Element, auf das **nth** zeigt, bezüglich der Sortierfolge anschließend an der Position befindet, an der es sich befinden würde, wenn der ganze Bereich sortiert würde. Alle Elemente, die kleiner sind als dieses, werden davor und alle anderen danach angeordnet. Die Anordnung der Elemente vor und nach dem n-ten ist undefiniert.

```
template<class RandomAccessIterator>
void nth_element(RandomAccessIterator first, RandomAccessIterator nth,
    RandomAccessIterator last); // eine weitere Version mit Compare
```

Beispiel: 

```
string s1 = "1523467";
nth_element(s1.begin(), s1.begin() + 0, s1.end());
// s1="1yyyyyy", wobei jedes y >= 1 ist
s1 = "1523467";
nth_element(s1.begin(), s1.begin() + 1, s1.end());
// s1="x2yyyyy", wobei x<=2 und y=>2 ist
s1 = "1523467";
nth_element(s1.begin(), s1.begin() + 2, s1.end());
// s1="xx3yyyy", wobei x<=3 und y=>3 ist
nth_element(s1.begin(), s1.begin() + 3, s1.end());
// s1="xxx4yyy", wobei x<=4 und y=>4 ist
```

### 15.8.3 Binäres Suchen in sortierten Bereichen

Die Algorithmen in diesem und den folgenden Abschnitten setzen voraus, dass der jeweils als Parameter übergebene Bereich bezüglich der verwendeten Vergleichsfunktion sortiert ist. Ihre Laufzeit ist für RandomAccess-Iteratoren proportional zum Logarithmus der Elementanzahl und für andere Iteratoren linear.

Mit *binary\_search* kann man mit einer binären Suche prüfen, ob der Wert *value* im Bereich  $[first, last)$  enthalten ist.

```
template<class ForwardIterator, class T>
bool binary_search(ForwardIterator first, ForwardIterator last,
    const T& value); // eine weitere Version mit Compare
```

Der Funktionswert von *binary\_search* ist *true*, falls im sortierten Bereich  $[first, last)$  ein Element mit dem Wert *value* enthalten ist.

Beispiel: 

```
string s = "125";
bool b1 = binary_search(s.begin(), s.end(), '2');//true
bool b2 = binary_search(s.begin(), s.end(), '3');//false
```

**lower\_bound** bzw. **upper\_bound** liefern die erste bzw. die letzte Position im sortierten Bereich  $[first, last)$ , in die *value* eingefügt werden kann, ohne dass die Sortierfolge verletzt wird.



```
template<class ForwardIterator, class T> ForwardIterator
lower_bound(ForwardIterator first, ForwardIterator last, const T& value);
// eine weitere Version mit Compare
```

```
template<class ForwardIterator, class T> ForwardIterator
upper_bound(ForwardIterator first, ForwardIterator last, const T& value);
// eine weitere Version mit Compare
```

Diese beiden Werte erhält man auch durch einen einzigen Aufruf der Funktion *equal\_range* als Elemente eines Paares :

```
template<class ForwardIterator, class T>
pair<ForwardIterator, ForwardIterator> equal_range(ForwardIterator first,
ForwardIterator last, const T& value); //eine weitere Version mit Compare
```

Beispiel: 

```
string s = "12378";
auto lo = lower_bound(s.begin(), s.end(), '4'); // *lo='7'
auto up = upper_bound(s.begin(), s.end(), '4'); // *up='7'
s = "12344478";
auto p = equal_range(s.begin(), s.end(), '4');
// *(p.first)='4', *(p.second)='7'
```

Die assoziativen Container (*map*, *multimap*, *set* usw) enthalten Elementfunktionen *lower\_bound*, *upper\_bound* und *equal\_range* mit einer logarithmischen Komplexität.

#### 15.8.4 Mischen von sortierten Bereichen

*merge* mischt die beiden sortierten Bereiche [*first1*, *last1*) und [*first2*, *last2*) zu einem sortierten Bereich zusammen. Dabei dürfen sich die beiden Bereiche nicht überlappen:

```
template<class InputIterator1, class InputIterator2, class OutputIterator>
OutputIterator merge(InputIterator1 first1, InputIterator1 last1,
InputIterator2 first2, InputIterator2 last2, OutputIterator result);
// eine weitere Version mit Compare
```

Beispiel: 

```
string s1 = "125", s2 = "126", s;
merge(s1.begin(), s1.end(), s2.begin(), s2.end(),
std::back_inserter(s)); // s="112256"
```

Die Funktion *merge\_files* mischt zwei sortierte Dateien zu einer neuen sortierten Datei zusammen. Dieses Ergebnis könnte man auch dadurch erhalten, dass man beide Dateien in einen Container einliest und diesen dann sortiert. Bei großen Dateien wäre das aber mit einem großen Speicherbedarf verbunden. Da *merge\_files* Stream-Iteratoren verwendet, wird aus jeder Datei immer nur ein Datensatz in den Hauptspeicher eingelesen.

```
template<typename T>
void merge_files(string in1fn, string in2fn, string outfn)
{
    ifstream in1(in1fn), in2(in2fn);
    ofstream out(outfn);
```

```

merge(istream_iterator<T>(in1), istream_iterator<T>(),
      istream_iterator<T>(in2), istream_iterator<T>(),
      ostream_iterator<T>(out, "\n"));
}

```

Falls die beiden zu mischenden Bereiche in demselben Container enthalten sind und hier unmittelbar aufeinander folgen, kann man diesen mit ***inplace\_merge*** so umordnen, dass der gesamte Container anschließend sortiert ist. Die beiden aufeinander folgenden Bereiche sind [*first, middle*) und [*middle, last*) und müssen bereits sortiert sein.

```

template<class BidirectionalIterator>
void inplace_merge(BidirectionalIterator first, BidirectionalIterator middle,
                   BidirectionalIterator last); // eine weitere Version mit Compare

```

Beispiel: `string s = "456123";`  
`inplace_merge(s.begin(), s.begin() + 3, s.end());`  
`// s="123456";`

Ein *inplace\_merge* ist z.B. vorteilhaft, wenn zwei sortierte Dateien nacheinander in einen Container eingelesen werden und der gesamte Container anschließend sortiert werden soll.

## Aufgabe 15.8

1. Definieren Sie die folgenden Funktions-Templates der STL selbst. Sie können sich dazu an den Algorithmen orientieren, deren Quelltext in diesem Abschnitt gezeigt wurde. Testen Sie diese mit verschiedenen Containerklassen, z.B. *vector*, *list*, *set*, *string* sowie mit einem Array.

```

template<class InputIterator, class T>
iterator_traits<InputIterator>::difference_type
count(InputIterator first, InputIterator last,
       const T& value);

template<class InputIterator, class Predicate>
iterator_traits<InputIterator>::difference_type
count_if(InputIterator first, InputIterator last,
         Predicate pred);

template<class ForwardIterator>
ForwardIterator min_element(ForwardIterator first,
                           ForwardIterator last);

```

2. In einer Folge mit einer ungeraden Anzahl von Werten ist der **Median** der Wert, der nach einer Sortierung der Folge in der Mitte steht. Bei einer geraden Anzahl von Werten ist der Median der Mittelwert der beiden mittleren Werte. Schreiben Sie ein Funktions-Template *Median*, das den Median der Werte aus einem Container der STL zurückgibt.

## 15.9 Numerische Algorithmen und Datentypen

Die Standardbibliothek enthält einige Algorithmen und Klassen für numerische Anwendungen. Da sie aber nur in speziellen Anwendungen von Bedeutung sind, werden sie nur kurz skizziert. Ab C++20 sind diese Algorithmen *constexpr*.

### 15.9.1 Numerische Algorithmen

Nach

```
#include <numeric> // oder import std.core; (siehe Abschnitt 2.13)
```

stehen im Namensbereich *std* einige Funktions-Templates zur Verfügung, die numerische Algorithmen typunabhängig implementieren. Sie können nicht nur mit Ganzzahl- und Gleitkommatentypen verwendet werden, sondern auch mit anderen Datentypen, die die im Algorithmus verwendeten Operationen haben.

Die folgenden Beispiele sollen nur zeigen, wie diese Algorithmen verwendet werden können. Eine bereichsbasierte *for*-Schleife ist oft leichter verständlich und genauso schnell.

*accumulate* summiert die Werte aus dem Bereich *[first,last)* zu dem Wert, der als Argument für *init* übergeben wurde.

```
template <class InputIterator, class T>
[[nodiscard]] constexpr T accumulate(
    InputIterator first, InputIterator last, T init)
```

In einer zweiten Variante kann als letztes Argument eine binäre Operation angegeben werden, die den nächsten Wert aus dem bisherigen Wert und dem Element berechnet, auf das der Iterator zeigt:

```
template <class InputIterator, class T>
[[nodiscard]] constexpr T accumulate(InputIterator first,
    InputIterator last, T init, BinaryOperation binary_op)
```

Diese Funktions-Templates können folgendermaßen implementiert sein:

```
template <class InputIterator, class T>
T accumulate(InputIterator first, InputIterator last, T init)
{
    while (first != last)
        init = init + *first++;
    return init;
}
```

```
template <class InputIterator, class T,
         class BinaryOperation>
T accumulate(InputIterator first, InputIterator last, T init,
             BinaryOperation binary_op)
{
    while (first != last)
        init = binary_op(init, *first++);
    return init;
}
```

Beispiel: Die Summe der Werte eines Containers mit Zahlen

```
std::array<double, 3> a = { 1.1, 2.2, 3.3 };
std::vector<double> v(a.begin(), a.end());
```

erhält man mit

```
auto sv = std::accumulate(v.begin(), v.end(), 0.0); // 6.6
auto sa = std::accumulate(a.begin(), a.end(), 0.0); // 6.6
```

Das Ergebnis ist dasselbe wie mit

```
double Summe = 0;
for (int i = 0; i < vd.size(); i++)
    Summe += vd[i];
```

Man muss allerdings mit dem Datentyp des *init*-Wertes aufpassen, da er der Datentyp des Ergebnisses ist. Mit

```
auto ac= std::accumulate(vd.begin(), vd.end(), 0); // 6
```

erhält man die Summe als Ganzzahlwert.

Die Strings aus einem Container sv können mit

```
std::string join1(std::vector<string> sv)
{
    string s;
    return std::accumulate(sv.begin(), sv.end(), s,
        [](std::string a, std::string b) {
            return a + "-" + b;
        });
}
```

zu einem String zusammengefügt werden, bei dem die einzelnen Strings durch ein "–" getrennt sind:

```
std::vector<string> sv{ "1", "2", "3"};
std::string s = join1(sv); // "-1-2-3"
```

Hier ist das Zeichen "-" am Anfang eventuell nicht gewünscht. Man kann es unterbinden, wenn man als *init*-Wert das erste Element nimmt und dann erst mit dem zweiten Element beginnt:

```
std::string join(std::vector<string> sv)
{ // Programmabbruch mit leerem sv
  return std::accumulate(next(sv.begin()), sv.end(), sv[0],
    [](std::string a, std::string b) {
      return a + "-" + b;
    });
}
```

Wie *accumulate* haben auch die folgenden Algorithmen noch eine zweite Version mit einem zusätzlichen Parameter *binary\_op*. *inner\_product* hat zwei solche Parameter.

```
template <class InputIterator1, class InputIterator2, class T>
T inner_product (InputIterator1 first1, InputIterator1 last1,
InputIterator2 first2, T init); // berechnet das innere Produkt
```

```
template <class InputIterator, class OutputIterator>
OutputIterator partial_sum (InputIterator first, InputIterator last,
OutputIterator result); // berechnet Teilsummen
```

```
template <class InputIterator, class OutputIterator>
OutputIterator adjacent_difference (InputIterator first, InputIterator last,
OutputIterator result); // berechnet Differenzen benachbarter Elemente
```

### 15.9.2 Valarrays $\Theta$

Die Klasse *valarray* der Standardbibliothek steht im Namensbereich *std* nach

```
#include <valarray> // oder import std.core; (siehe Abschnitt 2.13)
```

zur Verfügung. Ein *valarray* ist ein Array von Werten, ähnlich wie die Container-Klasse *vector*. Während ein *vector* aber vor allem der Verwaltung von Daten dient, sind für Variablen des Typs *valarray* auch Rechenoperation definiert. Diese Operationen werden dann für alle Elemente des Valarrays durchgeführt. So haben nach der Definition

```
int n = 8;
std::valarray<double> v1(n), v2(n);
for (int i = 0; i < n; i++) v1[i] = i; // v1[0]=0, ..., v1[7]=7
```

die Anweisungen

```
v2 = v1;      // for (int i=0; i<n; i++) v2[i]=v1[i];
v2 = v1 + v2; // for (int i=0; i<n; i++) v2[i]=v1[i]+v2[i];
```

denselben Effekt wie die als Kommentar angegebenen *for*-Schleifen. Damit ist mit Valarrays die in der Mathematik für Vektoren übliche Schreibweise möglich. Diese Schreibweise ist oft übersichtlicher als eine *for*-Schleife mit „normalen“ Arrays (wie „double a[n]“).

Neben dem Operator + sind die Operatoren

−, \*, /, %, ^, &

sowie

die trigonometrischen Funktionen *sin*, *cos*, *tan*, *acos*, *asin*, *atan*,  
die Hyperbelfunktionen *sinh*, *cosh*, *tanh*  
und die mathematischen Funktionen *exp*, *log*, *log10*, *pow*, *sqrt*, *abs*

definiert. Damit sind z.B. die folgenden Operationen möglich:

```
v1 = sin(v1); // v1[0]=sin(0), ..., v1[7]=sin(7)
v1 = sqrt(sin(v1)*sin(v1) + cos(v1)*cos(v1));
```

Sie haben dasselbe Ergebnis, wie wenn man die entsprechenden Operationen mit allen Elementen durchführt. Mit Funktionen wie *min*, *max*, *sum* usw. erhält man das Minimum, Maximum und die Summe der Elemente eines Valarrays:

```
double Min = v1.min();
double Max = v1.max();
double Sum = v1.sum();
```

Ursprünglich sollten die Operationen mit *valarray* optimiert implementiert und eventuell sogar auf verschiedenen Prozessoren parallel abgearbeitet werden. Diese wird aber von vielen Compilern nicht umgesetzt. Zeitmessungen haben gezeigt, dass manche Operationen mit *valarray* etwas schneller sind als gleichwertige Schleifen mit „normalen“ Arrays. Manchmal sind sie aber auch langsamer.

### Aufgabe 15.9.2

Bei manchen Experimenten (Physik, Psychologie usw.) besteht ein linearer Zusammenhang der Art

$$y = a \cdot x + b$$

zwischen einer unabhängigen Variablen  $x$  und einer abhängigen Variablen  $y$ . Allerdings sind die Werte von  $a$  und  $b$  oft nicht bekannt. Man versucht sie deswegen zu schätzen, indem man das Experiment mit  $n$  verschiedenen Werten von  $x_0, x_1, \dots, x_{n-1}$  wiederholt und dabei die Werte  $y_0, y_1, \dots, y_{n-1}$  für  $y$  ermittelt. Falls die Messwerte für  $y$  durch Störungen und/oder Messfehler verfälscht werden, kann man jedoch nicht erwarten, dass die Punkte  $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_{n-1}, y_{n-1})$  alle auf einer Geraden liegen.

Zur Lösung dieses Problems hat der Mathematiker Gauß vorgeschlagen, die Werte für  $a$  und  $b$  so zu bestimmen, dass das Quadrat der Abweichungen

$$F(a,b) = (y_0 - (ax_0+b))^2 + (y_1 - (ax_1+b))^2 + \dots + (y_{n-1} - (ax_{n-1}+b))^2$$

möglichst klein wird (**Methode der kleinsten Quadrate**). Die so ermittelte Gerade wird auch als **Regressionsgerade** bezeichnet. Mit

$$\begin{aligned}
s_{xy} &= x_0y_0 + x_1y_1 + \dots + x_{n-1}y_{n-1} \\
s_x &= x_0 + x_1 + \dots + x_{n-1} \\
s_y &= y_0 + y_1 + \dots + y_{n-1} \\
s_{xx} &= x_0x_0 + x_1x_1 + \dots + x_{n-1}x_{n-1} \\
x_M &= s_x/n \\
y_M &= s_y/n
\end{aligned}$$

führt dieser Ansatz auf die folgenden Werte für a und b:

$$\begin{aligned}
a &= (n \cdot s_{xy} - s_x \cdot s_y) / (n \cdot s_{xx} - s_x \cdot s_x) \\
b &= y_M - a \cdot x_M
\end{aligned}$$

1. Formulieren Sie diese Gleichungen

- a) mit Valarrays und den zugehörigen Funktionen (*sum* usw.)
- b) mit Schleifen und dem Indexoperator wie mit normalen Arrays.

2. Testen Sie die Lösungen für a und b mit n (2, 100, 10 000) Messwerten, die

- a) auf einer Geraden  $y = ax + b$  liegen. Die berechneten Werte müssen dann die ursprünglichen Werte für a und b ergeben.
- b) um kleine Zufallswerte von der Geraden  $y = ax + b$  abweichen. Die berechneten Werte

müssen dann in der Nähe der Werte für a und b liegen.

### 15.9.3 Zufallszahlen mit `<random>` Θ

Die einzige in C++03 verfügbare Funktion für Zufallszahlen ist **rand**: Sie gibt gleichverteilte Werte im Bereich 0..32767 zurück. Wegen dem kleinen Wertebereich und anderen Schwächen wird davon abgeraten, *rand* bei kritischen Anforderungen (z.B. Kryptografie) einzusetzen. C++11 wurde um Klassen (Funktionsobjekte) ergänzt, die

- neben gleichverteilten auch anders verteilte Werte (z.B. normal oder binomial verteilte) liefern
- Werte aus einem größeren Bereich liefern
- nach verschiedenen Kriterien besser sind (z.B. längere Zyklen haben)

Im Folgenden wird an einigen Beispielen gezeigt, wie diese Zufallszahlengeneratoren verwendet werden können. Sie stehen nach

```
#include <random> // oder import std.core; (siehe Abschnitt 2.13)
```

im Namensbereich *std* zur Verfügung und sind so aufgebaut, dass sie

- einen Generator für gleichverteilte Zufallszahlen mit
- einer Verteilungsfunktion

kombinieren und so sehr vielfältige Arten von Zufallszahlen erzeugen können.

## 1. Die zugrundeliegenden Generatoren für gleichverteilte Zufallszahlen wie z.B.

```
linear_congruential    mersenne_twister
subtract_with_carry    subtract_with_carry_01
```

können über zahlreiche Parameter konfiguriert werden. Normalerweise reichen die vordefinierten Spezialisierungen

```
using minstd_rand = linear_congruential_engine<uint_fast32_t,
                                                48271, 0, 2147483647>;
using mt19937 = mersenne_twister_engine<uint_fast32_t, 32, 624,
                                         397, 31, 0x9908b0df, 11, 0xffffffff, 7,
                                         0x9d2c5680, 15, 0xefc60000, 18, 1812433253>;
```

völlig aus. Die nächste Tabelle enthält die Zykluslänge dieser Generatoren. Sie gibt an, nach wie vielen Aufrufen sich die erzeugten Zufallszahlen wiederholen, und wird oft als ein Kennzeichen für die Qualität eines Zufallszahlengenerators betrachtet:

| Generator          | Zykluslänge   |
|--------------------|---------------|
| <i>minstd_rand</i> | $2^{31}-2$    |
| <i>mt19937</i>     | $2^{19937}-1$ |

Einer der einfachsten ist *minstd\_rand*, der den Park-Miller Algorithmus (siehe Abschnitt 2.4.7) implementiert. Alle diese Generatoren sind Funktionsobjekte: Das heißt, dass eine Variable eines dieser Datentypen wie eine Funktion aufgerufen werden kann. Jeder Aufruf liefert dann eine neue Zufallszahl im Bereich 0 .. 2147483647-1 zurück.

Beispiel: Jeder Aufruf von *rnd* liefert eine neue Zufallszahl:

```
std::minstd_rand rnd;
for (int i = 0; i < 10; i++)
{
    unsigned int r = rnd();
    cout<<r<<endl;
}
```

Wenn man einen Generator wie *rnd* mit dem Standardkonstruktor initialisiert, erhält er bei jedem Start des Programms denselben Startwert und erzeugt dann dieselbe Folge von Zufallszahlen.

- Wenn man bei jedem Start des Programms eine andere Folge von Zufallszahlen will, muss man den Zufallszahlengenerator jedes Mal mit einem anderen Wert initialisieren. Dazu liest man oft einen Wert aus einem Gerät aus, der unabhängig vom Programmablauf ist, wie z.B. die aktuelle Uhrzeit *std::time(0)*:

```
std::minstd_rand rnd(std::time(0));
```

Ein von *random\_device* gelieferter Wert ist nach Angaben von Microsoft kryptografisch sicher (<https://docs.microsoft.com/de-de/cpp/standard-library/random?view=vs-2019>):



```
std::random_device rd;
unsigned int Startwert = rd();
std::mt19937 rnd(Startwert);
```

3. Als **Verteilungen** stehen Gleichverteilungen, Bernoulli-, Normal- und Poisson-Verteilungen zur Verfügung, wie z.B.:

| Verteilung                   | Konstruktorparameter   |
|------------------------------|------------------------|
| <i>uniform_int</i>           | min = 0, max = 9       |
| <i>uniform_real</i>          | min = 0, max = 1       |
| <i>normal_distribution</i>   | mean = 0, sigma = 0    |
| <i>binomial_distribution</i> | int t=1, double p= 0.5 |

Diese Verteilungen haben einen überladenen Aufrufoperator, dem man einen Generator übergeben kann, und der dann einen Zufallswert zurückliefert:

```
result_type operator()(Engine& eng);
```

Das nächste Beispiel zeigt, wie die Generatoren mit den Verteilungen kombiniert werden können, um gleichverteilte oder normalverteilt Zufallszahlen zu erzeugen.

Beispiel: In den nächsten beiden Funktionen wird ein vector v mit Zufallswerten gefüllt. Für diese Werte werden der Mittelwert und weitere Kennzahlen berechnet:

```
void test_Gleichverteilung()
{
    unsigned int Startwert = std::random_device{}();
    std::mt19937 Generator(Startwert);
    std::uniform_real_distribution<> ur(1.0, 2.0);
    std::vector<double> v;
    for (int i = 0; i < 1000; i++)
    {
        // fülle v mit N gleichverteilten double-Werten
        v.push_back(ur(Generator));
    }
    double Mittelwert = std::accumulate(v.begin(), v.end(),
                                         0.0) / v.size();
    double Min = *std::min_element(v.begin(), v.end());
    double Max = *std::max_element(v.begin(), v.end());
    std::cout << "Mittelwert=" << Mittelwert << " Min=" <<
               Min << " Max=" << Max << endl;
}
```

erhält man etwa die folgende Ausgabe:

```
Mittelwert=1.5048 Min=1.00035 Max=1.99877
```

Mit

```

void test_Normalverteilung(double mean, double stddev)
{
    std::normal_distribution<double> Normalverteilung(mean,
                                                       stddev);

    std::mt19937 Generator(std::random_device{}());
    std::vector<double> v;
    for (int i = 0; i < 10000; ++i)
    { // fülle v mit N normalverteilten Werten
        v.push_back(Normalverteilung(Generator));
    }
    // Vergleiche die erwarteten mit den erzeugten Werten
    double Mittelwert = std::accumulate(v.begin(), v.end(),
                                         0.0) / v.size();
    double Mittelwert_der_Quadrate = std::inner_product(
        v.begin(), v.end(), v.begin(), 0.0) / v.size();
    double StandardAbw = std::sqrt(Mittelwert_der_Quadrate -
                                    Mittelwert * Mittelwert);
    cout << "Erwartet:    Mittelwert=" << mean << "
          << "StandardAbw=" << stddev << endl;
    cout << "Tatsächlich: Mittelwert=" << Mittelwert << "
          << "StandardAbw=" << StandardAbw << endl;
}

```

erhält man etwa die folgende Ausgabe:

```

Erwartet: Mittelwert=10 StandardAbw=0.5
Tatsächlich: Mittelwert=10.0029 StandardAbw=0.496326

```

### 15.9.4 Komplexe Zahlen $\Theta$

Die im C++-Standard definierten Klassen für **komplexe Zahlen** erhält man mit

```
#include <complex> // oder import std.core; (siehe Abschnitt 2.13)
```

Bei der Definition von Variablen dieser Klassen gibt man nach *complex* in spitzen Klammern den Datentyp des Real- und Imaginärteils an. Dafür sind die Datentypen *float*, *double* und *long double* zulässig:

```

std::complex<float> cf = -1;
std::complex<double> cd = -1;

```

Aus diesen komplexen Zahlen, die alle den Wert  $-1$  haben, kann man mit der Funktion *sqrt* die Wurzel ziehen:

```

cf = sqrt(cf);
cd = sqrt(cd);

```

Dabei erhält man die Ergebnisse

```
0+1i //Darstellung mit der Funktion to_string von unten
```

Zieht man dagegen die Wurzel aus dem Wert  $-1$  des Datentyps *double*, hat das einen NAN-Wert zur Folge:

```
cd = sqrt(-1);
```

Eine komplexe Zahl besteht aus einem **Real-** und **Imaginärteil** des Datentyps, der bei der Definition der Variablen angegeben wurde. Dieser Datentyp wird im Folgenden mit *T* bezeichnet und steht für *float*, *double* oder *long double*. In jeder dieser Klassen werden der Real- und Imaginärteil durch die Datenelemente

```
T re_, im_ ; // interne Datenelemente für den Real- und Imaginärteil
```

dargestellt. Allerdings besteht keine Möglichkeit, diese Elemente direkt anzusprechen. Man erhält sie aber sowohl mit den Elementfunktionen

```
T imag() const { return im_ ; } // Die Anweisungen in geschweiften Klammern
T real() const { return re_ ; } // werden beim Aufruf der Funktion ausgeführt
```

als auch mit gleichnamigen globalen Funktionen. Damit kann man eine komplexe Zahl durch die Funktion *to\_string* als *string* darstellen:

```
std::string to_string(std::complex<double> c)
{
    return std::to_string(c.real()) + "+" + std::to_string(c.imag()) +
        "i";
}
```

Variablen komplexer Zahlen können mit dem **Konstruktor**

```
complex(const T& re = T(), const T& im = T());
```

definiert werden. Ruft man ihn ohne Argument auf, werden Real- und Imaginärteil auf Null gesetzt. Mit einem Argument wird dieses zum Realteil, und der Imaginärteil wird Null:

```
std::complex<float> cf;           // cf.real()=0, cf.imag()=0;
std::complex<double> cd = -1;    // cd.real()=-1, cd.imag()=0;
std::complex<double> cd(-1);     // wie cd=-1;
std::complex<double> cl(1, -1);  // cl.real()=1, cl.imag()=-1;
```

Für komplexe Zahlen sind die Operatoren  $+$ ,  $-$ ,  $*$ ,  $/$ ,  $+=$ ,  $-=$  usw. definiert. Ausdrücke mit diesen Operatoren können auch komplexe Zahlen und Gleitkommatentypen verbinden:

```
cf = cf + 1.0f;
cd = cd + 1.0;
```

Allerdings können keine verschiedenen Typen komplexer Zahlen kombiniert werden:

```

cf = cf + 1.0; // complex<float> + double geht nicht
cd = cd + 1;  // complex<double> + int geht nicht
cd = cd + cf; // complex<float>+complex<double> geht nicht

```

Mit den Operatoren `==` und `!=` können komplexe Zahlen auf Gleichheit oder Ungleichheit geprüft werden. Da komplexe Zahlen aber nicht wohlgeordnet sind, können sie nicht mit einem der Operatoren `<`, `<=`, `>` und `>=` verglichen werden.

Seit C++11 sind nach `#include <complex>` im Namensbereich `std::complex_literals` die Literaloperatoren `"i"`, `"i"` und `"i"` definiert:

```

constexpr complex<double> operator""i(long double _Val)
{ // return imaginary _Val
  return (complex<double>{0.0, static_cast<double>(_Val)});
}

```

Damit können Literale für komplexe Zahlen in der üblichen mathematischen Schreibweise angegeben werden:

```

using namespace std::complex_literals;
std::complex<double> c1 = 3.0 + 4i;
std::string sc1 = to_string(c1); // sc1 = "3.000000+4.000000i"

```

Für die üblichen Operationen mit komplexen Zahlen stehen globale Funktionen zur Verfügung:

```

T norm(const complex<T>& a) // das Quadrat des Betrags
T abs(const complex<T>& a) // Betrag, die Wurzel aus norm(a)
complex<T> conj(const complex<T>& a) // der konjugierte Wert von a
T arg(const complex<T>& a) // Winkel in Polarkoordinaten
complex<T> polar(const T& r, const T& theta) // komplexe Zahl zu Polarkoordinaten
(r,theta)

```

Beispiele: `std::complex<double> c(3, 4); // c=3+4i`  
`double d = std::norm(c); // d=25`  
`d = std::abs(c); // d=5`  
`c = std::conj(c); // c=3-4i`

Außerdem sind zahlreiche mathematische Funktionen für komplexe Zahlen definiert:

```

complex<T> exp(const complex<T>& x); // ex
complex<T> log10(const complex<T>& x); // Logarithmus zur Basis 10
complex<T> log(const complex<T>& x); // natürlicher Logarithmus
complex<T> pow(const complex<T>& x, int y); // xy
complex<T> pow(const complex<T>& x, Ty); // xy
complex<T> pow(const complex<T>& x, const complex<T>& y); // xy
complex<T> pow(Tx, const complex<T>& y); // xy
complex<T> sqrt(const complex<T>& x)
die trigonometrischen Funktionen sin, cos, tan, asin, acos, atan
die Hyperbelfunktionen sinh, cosh, tanh

```

### Aufgaben 15.9.4

#### 1. Die quadratische Gleichung

$$ax^2+bx+c=0$$

hat die beiden Lösungen

$$x = (-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac})/2a$$

Schreiben Sie ein Programm, das die Lösung dieser Gleichung zu den komplexen Koeffizienten  $a=2+3i$ ,  $b=4-5i$  und  $c=-7+8i$  ausgibt. Außer der Lösung soll auch noch die Probe angezeigt werden.

#### 2. Die Gleichung vom Grad $n$ ( $n \geq 1$ , ganzzahlig)

$$x^n-1=0$$

hat  $n$  komplexe Lösungen, die mit

$$w=\cos(2\pi/n) + i\sin(2\pi/n)$$

durch  $x_0=1$ ,  $x_1=w$ ,  $x_2=w^2$ , ...,  $x_{n-1}=w^{n-1}$  gegeben sind. Geben Sie (z.B. für  $n=10$ ) jede dieser **Einheitswurzeln**  $x_i$  aus.

### 15.9.5 Numerische Bibliotheken neben dem C++-Standard $\Theta$

Neben den numerischen Bibliotheken, die zum C++-Standard gehören, gibt es noch zahlreiche weitere. Auf einige der wichtigsten soll hier kurz hingewiesen werden.

Die GNU Scientific Library (GSL - ) enthält zahlreiche mathematische Funktionen aus verschiedenen Bereichen für C and C++ Programme.

Die Boost Bibliothek (<http://www.boost.org>) enthält unter anderem die Bibliotheken:

- Math: weitere mathematische Funktionen
- Multiprecision: Klassen für Ganzzahl- und Gleitkommaoperationen mit erhöhter Genauigkeit
- Rational: Eine Klasse für rationale Zahlen und ihre Arithmetik
- Interval: Intervall-Arithmetik, gibt für Operationen ein Intervall zurück, in dem Ergebnisse liegen
- uBLAS: Matrix- und Vektorklassen sowie zugehörige Operationen

## 15.10 Parallele Algorithmen der STL

In C++17 wurden viele der STL-Algorithmen mit parallelen Versionen überladen, bei denen Teilaufgaben auf verschiedene Threads (siehe Abschnitt 17.1) verteilt werden.

Diese parallelen Algorithmen haben bis auf ein zusätzliches erstes Argument dieselbe Signatur wie ihre nicht parallelen Varianten. Dieses erste Argument ist einer der nach

```
#include <execution>
```

im *namespace execution* verfügbaren Werte *seq*, *par* und *par\_unseq*, die auch als execution policy bezeichnet werden:

```
namespace execution
{
    class sequenced_policy { // request for sequential execution with
    // ...                      termination
    };

    inline constexpr sequenced_policy seq{};

    class parallel_policy { // request for parallel execution with
    // ...                      termination
    };

    inline constexpr parallel_policy par{};

    class parallel_unsequenced_policy { // request for parallel
    // execution without thread identity with termination
    // In Visual Studio 2019 äquivalent zu parallel_policy
    // ...
    };

    inline constexpr parallel_unsequenced_policy par_unseq{};
} // namespace execution
```

Diese Argumente wirken sich folgendermaßen aus:

| execution policy |                                                                                                                                                                                                                                            |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>seq</i>       | Sequenzielle Ausführung – kein Multithreading. Alle Anweisungen werden in demselben <i>thread</i> wie das aufrufende Programm ausgeführt. Wie ohne die Angabe eines execution-Arguments.                                                   |
| <i>par</i>       | Versuche Multithreading. Der Algorithmus kann threads starten, die Teilaufgaben parallel ausführen.                                                                                                                                        |
| <i>par_unseq</i> | Dieser Wert ist im C++-Standard für SIMD und Vektorisierung vorgesehen. Diese werden aber von Microsoft derzeit und vermutlich auch in Zukunft nicht unterstützt. Diese policy ist bei Visual C++ gleich wie bei <i>par</i> implementiert. |

Wenn in einem *thread* eine Funktion aufgerufen wird, die eine Exception auslöst, führt das zu einem Programmabbruch (siehe Abschnitt 17.1.6). Deswegen sollten an die parallelen Algorithmen nur Funktionen übergeben werden, die keine Exceptions auslösen. Das gilt auch für *std::execution::seq*.

Der C++-Standard verlangt allerdings nicht, dass ein Algorithmus mit einer ExecutionPolicy auch tatsächlich Teilaufgaben auf Threads verteilt. Microsoft hat zwar alle Algorithmen mit einem solchen ersten Parameter bereitgestellt. Bei einigen Algorithmen wurde aber eine parallele Implementierung verzichtet, da sie keine Geschwindigkeitsvorteile bringt.

Die parallele Ausführung von Teilaufgaben eines Algorithmus führt oft zu kürzeren Laufzeiten (siehe Abschnitt 15.10.1), aber nicht immer (siehe Abschnitt 15.10.2). Auch der Aufruf eines Algorithmus aus der Standardbibliothek wie `std::search` (siehe Abschnitt 15.2.4) kann mit einer parallelen execution policy langsamer sein:

| Benchmarks Visual Studio                      | string 10MB |            | string 100 MB |           |
|-----------------------------------------------|-------------|------------|---------------|-----------|
|                                               | 4 Zeichen   | 8 Zeichen  | 4 Zeichen     | 8 Zeichen |
| <code>std::search</code>                      | 0,021 Sek.  | 0,022 Sek. | 0,19 Sek.     | 0,22 Sek. |
| <code>std::search(std::execution::seq,</code> | 0,03 Sek.   | 0,04 Sek.  | 0,30 Sek.     | 0,40 Sek. |
| <code>std::search(std::execution::par,</code> | 1,00 Sek.   | 1,00 Sek.  | 9,0 Sek.      | 10,5 Sek. |

15.10.1 `std::sort`

Ein Container `v` (z.B. ein `vector`) wie

```
vector<int> v = { 3, 1, 7, 19, 5 };
```

wird mit der klassischen nichtparallelen Version des `sort`-Algorithmus durch den Aufruf

```
std::sort(v.begin(), v.end());
```

sortiert. Die seit C++17 verfügbaren parallelen Versionen

```
template <class ExecutionPolicy, class RandomAccessIterator>
void sort(ExecutionPolicy&& exec, const RandomAccessIterator first,
          const RandomAccessIterator last) noexcept
```

erhält man mit einer execution policy als erstem Argument:

```
std::sort(std::execution::seq, v.begin(), v.end());
std::sort(std::execution::par, v.begin(), v.end());
std::sort(std::execution::par_unseq, v.begin(), v.end());
```

Microsoft weist darauf hin, dass Geschwindigkeitsverbesserungen durch eine parallele Ausführung von `std::sort` erst ab etwa 2000 zu sortierenden Elementen spürbar werden. Mit einem 4-Kern Prozessor wurden die folgenden Zeiten gemessen:

| Benchmarks VS 2019.5 x64 Release /O2 Laufzeit in Millisekunden |         |         |         |          |
|----------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|----------|
| <code>vector&lt;int&gt; a(N); n=1000</code>                    | N=1'000 | N=10*n  | N=100*n | N=1000*n |
| <code>sort(a.begin(), a.end());</code>                         | 0,12 ms | 0,58 ms | 6,5 ms  | 66 ms    |
| <code>sort(execution::seq,...);</code>                         | 0,04 ms | 0,53 ms | 6,5 ms  | 66 ms    |
| <code>sort(execution::par,...);</code>                         | 0,05 ms | 0,23 ms | 2,3 ms  | 22 ms    |

Offensichtlich können die parallelen Algorithmen eine sehr einfache Möglichkeit sein, die Laufzeit von Algorithmen deutlich zu beschleunigen.

### 15.10.2 Parallel for mit *for\_each*

Der Algorithmus *for\_each* aus `<algorithm>` hat seit der Einführung der bereichsbasierten *for*-Schleife etwas an Bedeutung verloren, da diese oft einfacher und vielseitiger als *for\_each* ist.

Die parallele Version von *for\_each* ist aber oft einfacher als der Start von Threads mit *thread* oder *async*. Bei *for\_each* muss als erstes Argument nur eine execution policy wie *std::execution::par* angegeben werden. Beim Start von Threads mit *thread* oder *async* muss man dagegen auch noch Feinheiten bei *thread.join* oder *future.get* beachten.

Der parallele *for\_each*-Algorithmus gibt im Unterschied zum nicht parallelen keinen Funktionswert zurück.

Beispiel: Mit

```
std::vector<long long> Fibos_mit_parallel_for_each()
{ // #include <algorithm> für for_each
  std::array<int, 4> a = {42,43,44,45}; // #include <array>
  std::vector<long long> result;        // #include <vector>
  std::mutex m;                        // #include <mutex>
  std::for_each(std::execution::par, std::begin(a),
               std::end(a), [&](int i)
  { // Dieser Lambda-Ausdruck wird als thread gestartet
    long long r = fibo(i);
    std::lock_guard<std::mutex> lg(m);
    result.push_back(r);
  });
  return result;
}
```

wird jeder Aufruf des Lambda-Ausdrucks in einem eigenen Thread gestartet, ohne dass man diese Threads wie in den nächsten beiden Funktionen explizit mit *thread* oder *async* (siehe Abschnitte 17.1.2 und 17.1.1) erzeugen muss. Die Laufzeiten sind bei allen 3 Funktionen gleich.

```
std::vector<long long> Fibos_mit_threads()
{ // analog zu Fibos_mit_parallel_for_each
  std::array<int,4> a = {42,43,44,45}; // #include <array>
  std::vector<long long> result;        // #include <vector>
  std::mutex m;                        // #include <mutex>
  std::thread t[a.size()];             // #include <thread>
```



```

for (int i = 0; i < a.size(); i++)
    t[i] = std::thread([&
    {
        long long r = fibo(a[i]);
        std::lock_guard<std::mutex> lg(m);
        result.push_back(r);
    }]);
for (int i = 0; i < a.size(); i++)
    t[i].join();
return result;
}

```

oder

```

std::vector<long long> Fibos_mit_async()
{ // analog zu Fibos_mit_parallel_for_each
    std::array<int,4> a = {42,43,44,45}; // #include <array>
    std::vector<long long> result; // #include <vector>
    std::future<long long> f[a.size()]; // #include <future>
    for (int i = 0; i < a.size(); i++)
        f[i] = async(std::launch::async, fibo, a[i]);
    for (int i = 0; i < a.size(); i++)
        result.push_back(f[i].get());
    return result;
}

```

Allerdings setzt die parallele Version von *for\_each*

```

template< class ExecutionPolicy, class ForwardIt, class Function >
void for_each(ExecutionPolicy&& policy, ForwardIt first, ForwardIt
              last, Function f);

```

voraus, dass ein Bereich durchlaufen wird. Diese Voraussetzung ist nicht immer gegeben.

Wenn die von *for\_each* erzeugten Threads auf gemeinsame Daten zugreifen (kritischer Abschnitt, siehe Abschnitt 17.2), muss z.B. mit einem *lock\_guard* und einem *mutex* verhindert werden, dass mehrere Threads gleichzeitig auf die gemeinsamen Daten zugreifen.

Beispiel: In *Fibos\_mit\_parallel\_for\_each* schreiben die verschiedenen Threads in den *vector result*. Wenn die einzelnen Threads dagegen auf verschiedene Datenbereiche zugreifen, ist keine Synchronisation notwendig:

```

std::vector<long long> Fibos_mit_parallel_for_each_no_cs()
{
    std::array<int, 4> a = { 42, 43, 44, 45 };
    std::vector<long long> result(a.size()); // 4 Elemente
    std::for_each(std::execution::par, std::begin(a),
                  std::end(a), [&](int i)
    { // Der i-te thread schreibt nur in result[i]
        result[i] = fibo(i);
    });
}

```

```
    return result;
}
```

Eine parallele Ausführung von kurzen Threads kann deutlich langsamer sein als eine sequenzielle Ausführung.

Beispiel: In

```
double sum_for_sequential(const std::vector<int>& v)
{
    double result = 0;
    for (int i = 0; i < v.size(); i++)
        result += v[i];
    return result;
}

double sum_for_each_sequential(const std::vector<int>& v)
{
    double result = 0;
    std::for_each(std::execution::seq, v.begin(), v.end(),
        [&](int i) {
            result += i;
        });
    return result;
}
```

wird die Summation aller Werte eines Containers *v* in einem einzigen Thread ausgeführt. Dagegen wird in

```
double sum_for_each_parallel(const std::vector<int>& v)
{
    double result = 0;
    std::mutex m; // #include <mutex>
    std::for_each(std::execution::par, v.begin(), v.end(),
        [&](int i) {
            std::lock_guard<std::mutex> lg(m);
            result += i;
        });
    return result;
}
```

für jede Addition ein eigener Thread gestartet. Da das Starten eines Threads länger dauert als die Addition, ist die sequenzielle Version schneller als die parallele:

| Benchmarks VS 2019.5 x64 Release /O2 Laufzeit in Millisekunden |        |        |         |
|----------------------------------------------------------------|--------|--------|---------|
| summiere vector<int> a(N); n=1000000                           | N=n    | N=10*n | N=100*n |
| mit <i>for</i>                                                 | 1,2 ms | 13 ms  | 130 ms  |
| mit <i>for each(std::execution::seq,</i>                       | 1,2 ms | 13 ms  | 130 ms  |
| <i>mit for each(std::execution::par,</i>                       | 24 ms  | 238 ms | 2400 ms |

### 15.10.3 *std::reduce* und *std::transform\_reduce*

In Abschnitt 15.10.2 haben wir am Beispiel der einfachen Summation

```
double sum_for_each_parallel(const std::vector<int>& v)
{
    double result = 0;
    std::mutex m; // #include <mutex>
    std::for_each(std::execution::par, v.begin(), v.end(),
        [&](int i) {
            std::lock_guard<std::mutex> lg(m);
            result += i;
        });
    return result;
}
```

gesehen, dass die Parallelisierung von zu kurzen Anweisungen keinen Laufzeitgewinn bringt. Mit

```
d = std::accumulate(std::begin(v), std::end(v), 0.0);
```

hätten wir dasselbe Ergebnis und etwa dieselbe Laufzeit erhalten. Da die Operationen in *accumulate* zu kurz sind, gibt es von diesem Algorithmus auch keine parallele Überladung.

Mit den *reduce*-Algorithmen gibt es aber eine parallele Alternative, die oft (unter gewissen Voraussetzungen) einsetzbar ist. Die einfachste Variante

```
template <class ExecutionPolicy, class ForwardIterator, class T>
T reduce(ExecutionPolicy && exec, const ForwardIterator first,
    const ForwardIterator last, T init) noexcept
```

führt dieselben Operationen wie *accumulate* aus. Allerdings werden nicht die einzelnen Additionen in einem Thread ausgeführt, sondern Gruppen von Additionen. Diese Gruppen werden vom Compiler gebildet, und die einzelnen Operationen werden in einer unbestimmten Reihenfolge ausgeführt.

Beispiel: Bei der Addition der Werte

a[0] a[1] a[2] a[3] a[4] a[5] a[6] a[7] a[8] a[9]

bildet *reduce* Gruppen von Werten wie z.B.

s0=a[0] a[1] a[2];      s1=a[3] a[4];      s2=a[5] a[6] a[7] a[8] a[9]

die jeweils in einem Thread berechnet werden. Der Rückgabewert ist dann die Summe

s0 + s1 + s2

wobei sich die Werte auch in einer anderen Reihenfolge ergeben können:

$$s1 + s0 + s2$$

Da die Operationen von *reduce* ungeordnet werden können, müssen die Operationen assoziativ und kommutativ sein. Diese Voraussetzung ist z.B. bei strings und Gleitkommatentypen nicht erfüllt.

Laufzeitmessungen zeigen, dass die parallele Summierung mit *reduce* deutlich schneller ist:

| Benchmarks VS 2019.5, x64 Release /O2 Laufzeit in Millisekunden |        |        |         |
|-----------------------------------------------------------------|--------|--------|---------|
| <code>vector&lt;int&gt; v(N); n=1000000</code>                  | N=n    | N=10*n | N=100*n |
| <code>std::accumulate(v.begin(), ...</code>                     | 1,2 ms | 13 ms  | 130 ms  |
| <code>std::reduce(execution::seq, ...</code>                    | 0,4 ms | 4 ms   | 40 ms   |
| <code>std::reduce(execution::par, ...</code>                    | 0,2 ms | 2 ms   | 20 ms   |

Vermutlich besteht aber nur selten die Notwendigkeit, die Werte aus einem Vektor mit Zahlen zu addieren.

Oft kann man eine Aufgabe in die folgende Problemstellung übertragen: Transformiere die Elemente in einen Wert und führe dann mit diesem Wert eine Operation aus. Das ist mit dem Algorithmus *transform\_reduce* möglich:

```
template <class ExecutionPolicy, class ForwardIterator, class T,
class BinaryOperation, class UnaryOperation>
T transform_reduce(ExecutionPolicy&&,
    const ForwardIterator first, const ForwardIterator last,
    T init,
    BinaryOperation reduce_op,
    UnaryOperation transform_op) noexcept
```

Hier deutet das „reduce“ im Namen schon darauf hin, dass die Elemente in Gruppen zusammengefasst werden und die Operationen mit den Elementen aus einer Gruppe in einem eigenen Thread durchgeführt werden. Zur Vereinfachung soll dieser Algorithmus aber ohne Berücksichtigung dieser Gruppierung beschrieben werden.

*transform\_reduce* initialisiert zuerst eine Variable des Datentyps von *init* mit dem Wert *init*

```
T tmp = init;
```

und durchläuft dann den Bereich *[first, last)*. Für jedes Element *\*e* in diesem Bereich wird dann der Rückgabewert der unären Operation mit *\*e* bestimmt. Der Wert von *tmp* wird dann durch das Ergebnis der binären Operation mit *tmp* und dem Rückgabewert ersetzt:

```
tmp = reduce_op(tmp, transform_op(*e);
```

Durch die folgenden Anweisungen erhält man die Summe aller Dateigrößen in *files*:

```
vector<fs::path> files{ GetFilesMitCopyRekursiv(start) };
```

```

filesizes = std::transform_reduce(std::execution::par,
    files.begin(), files.end(),
    unsigned long long(0), // Anfangswert einer Variablen tmp
    std::plus(), // Operation, die für jedes Element in [begin,end)
                  mit der Variablen tmp und dem Funktionswert des nächsten
                  Arguments ausgeführt wird
    [](const fs::path& p) { return
        fs::is_regular_file(p) ? fs::file_size(p) : 0; }
); // is_regular_file ist für ein Verzeichnis false

```

Mit dieser Funktion wurden die folgenden Laufzeiten gemessen:

| Benchmarks VS 2019.5, x64 Release /O2, Laufzeit<br>in Sekunden | seq       | par      |
|----------------------------------------------------------------|-----------|----------|
| summiere Dateigrößen sequenziell                               | 0,85 Sek. | -        |
| summiere Dateigrößen mit <i>std::for_each</i>                  | 0,85 Sek. | 0,9 Sek. |
| summiere Dateigrößen mit <i>std::transform_reduce</i>          | 1,2 Sek.  | 0,4 Sek. |

## 16 Zeiten und Kalenderdaten mit *chrono*

Seit C++11 steht in C++ nach

```
#include <chrono>
```

eine leistungsfähige Bibliothek für Zeitpunkte (z.B. Uhrzeiten), Zeiträume (z.B. 5 Sekunden) und Uhren zur Verfügung. Mit dieser Bibliothek kann man z.B. die aktuelle Uhrzeit anzeigen oder die Dauer der Ausführung von Anweisungen messen. Im Zusammenhang mit Multithreading (siehe Kapitel 1) wird sie benötigt, um ein Programm bzw. einen Thread eine bestimmte Zeit zu blockieren (d.h. von der Zuteilung von CPU-Zeit auszunehmen), eine bestimmte Zeit auf eine Bedingungsvariable oder eine Sperre (z.B. ein *lock* auf ein Mutex) zu warten.

Die Klassen und Funktionen dieser Bibliothek sind in vielerlei Hinsicht einfacher und sicherer als die klassischen Bibliotheken wie z.B. die von C, die ähnliche Möglichkeiten bieten. In diesen wird eine Zeitdauer oft einfach durch einen *int*-Wert angegeben, wie z.B. in

```
sleep(5);
```

Hier muss man wissen, was das Argument 5 bedeutet (5 Millisekunden oder 5 Sekunden oder noch etwas Anderes?). Mit den entsprechenden Funktionen aus *chrono* muss man die Zeiteinheit angeben, z.B.

```
sleep(5s); // 5s steht für 5 Sekunden
```

Deshalb ist die Gefahr geringer, Zeiteinheiten zu verwechseln. Die *chrono*-Bibliothek hat zahlreiche weitere Vorteile dieser Art.

Achtung: Bis auf die in Abschnitt 16.1 beschriebene Klasse *ratio* sind alle in diesem Kapitel beschriebenen Klassen im Namensbereich *std::chrono* (nicht im Namensbereich *std*) enthalten.

### 16.1 Brüche als Datentypen: Das Klassen-Template *ratio*

In *chrono* werden für Zeiträume und Zeitpunkte Brüche (rationale Zahlen mit einem Zähler und einem Nenner) verwendet. Diese werden durch den Datentyp (ein Klassen-Template mit Nicht-Typ Parametern)

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2021

R. Kaiser, C++ mit Visual Studio 2019,

[https://doi.org/10.1007/978-3-662-59476-6\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-662-59476-6_16)

```
template <intmax_t N, intmax_t D = 1>
class ratio {
public:
    static constexpr intmax_t num;
    static constexpr intmax_t den;
    using type = ratio<num, den>;
};
```

dargestellt, bei dem der Zähler *num* und der Nenner *den* den Datentyp *intmax\_t* haben („numerator“ und „denominator“ sind die englischen Worte für Zähler und Nenner). Das ist in Visual Studio ein Synonym für *long long* (64 Bit):

```
typedef long long intmax_t;
```

Es mag auf den ersten Blick überraschend sein, dass ein Bruch ein Datentyp und nicht etwa ein Wert ist. Deshalb ist dieser Datentyp auch nicht geeignet, zur Laufzeit Brüche zu addieren. Vielmehr ist das Ziel dieses Designs, Werte verschiedener Bruch-Typen konvertieren zu können.

Beispiele: Die ersten beiden Beispiele zeigen, dass der Zähler und Nenner gekürzt werden:

```
std::ratio<3, 60> r1;
std::cout << r1.num << "/" << r1.den << std::endl; // 1/20

std::ratio<60, 3> r2;
std::cout << r2.num << "/" << r2.den << std::endl; // 20/1

std::ratio<5> r3; // wie std::ratio<5,1> t3;
std::cout << r3.num << "/" << r3.den << std::endl; // 5/1
```

Mit dem Nenner 0 erhält man eine Fehlermeldung beim Kompilieren:

```
std::ratio<5,0> n; // Fehler beim Kompilieren
```

Dabei sind die Einzelheiten der Implementation von *ratio* gar nicht so wichtig. Entscheidend ist vor allem:

- Ein Bruch des Typs *ratio* ist ein Datentyp, und zwar ein Nicht-Typ Template. Er wird deshalb bereits während der Kompilation ausgewertet und führt nicht zu längeren Laufzeiten.
- Zähler und Nenner werden bereits während der Kompilation gekürzt: *num* und *den* erhalten die Werte
 
$$\begin{aligned} \text{num} &= \text{sign}(N) * \text{sign}(D) * \text{abs}(N) / \text{gcd}; \\ \text{den} &= \text{abs}(D) / \text{gcd}; \end{aligned}$$
- Viele Fehler (z.B. Division durch 0 oder ein Überlauf) werden schon während der Kompilation erkannt, was Laufzeitfehler reduziert.

Im C++-Standard sind unter anderem die folgenden Datentypen definiert:

```

using nano = ratio<1, 1'000'000'000>; // wie typedef ratio<1,
                                     1'000'000'000> nano;

using micro =    ratio<1, 1'000'000>;
using milli =    ratio<1, 1'000>;
using centi =    ratio<1, 100>;
using deci =     ratio<1, 10>;
using deca =     ratio< 10, 1>;
using hecto =    ratio< 100, 1>;
using kilo =     ratio< 1'000, 1>;
using mega =     ratio< 1'000'000, 1>;

```

## 16.2 Ein Datentyp für Zeiteinheiten: *duration*

Mit der Klasse *duration* kann man eine Zeiteinheit (Zeitdauer, z.B. 5 Sekunden, 5 Minuten, 5 Millisekunden) darstellen. Obwohl die Grundidee dieser Klasse in wenigen Zeilen dargestellt werden kann,

```

template<class Rep, class Period = ratio<1>> // aus <chrono>, stark
class duration {                             vereinfacht
public:
    using rep = Rep;
    using period = typename Period::type;

    constexpr _Rep count() const
    {
        return rep_;
    }

private:
    rep rep_; // exposition only, the stored rep
};

```

ist sie auf den ersten Blick nicht unbedingt intuitiv. Falls Sie also nicht gleich sehen, wieso *duration* so gestaltet wurde, lesen Sie einfach weiter. In etwa einer halben Seite sehen Sie dann, dass die diese Klasse einfach und intuitiv verwendet werden kann.

In *duration* wird durch *static\_assert* sichergestellt, dass das Typ-Argument für *\_Period* ein *ratio* ist. Dieser Bruch gibt die Dauer einer Zeiteinheit in Einheiten einer Sekunde an. Das erste Typ-Argument *\_Rep* ist der arithmetischer Datentyp, in dem die Anzahl der Zeiteinheiten angegeben ist.

Im Namensbereich *std::chrono* sind diese Einheiten definiert:

```

using nanoseconds = duration<long long, nano>; // wie typedef
                                                duration<long long, nano> nanoseconds;
using microseconds = duration<long long, micro>;
using milliseconds = duration<long long, milli>;
using seconds = duration<long long>;

```



```
using minutes      = duration<int, ratio<60>>;
using hours        = duration<int, ratio<3600>>;
```

Es ist auch möglich, eigene *duration*-Typen zu definieren. Da das erste Typ-Argument ein beliebiger arithmetischer Datentyp sein kann, ist auch ein Gleitkomma-Wert zulässig. Damit kann die Anzahl der Perioden auch Nachkommastellen haben:

```
typedef std::chrono::duration<double, std::ratio<1, 50>> AC_Hertz;
```

Beispiel: Mit diesen Einheiten ist *rep* der Datentyp des ersten Typ-Arguments:

```
std::chrono::milliseconds::rep x; // long long x;
std::chrono::hours::rep y; // int y

AC_Hertz::rep z; // double z
```

Das zweite Typ-Argument ist ein *ratio* und hat den Zähler *num* und den Nenner *den*. Dieser Datentyp ist die Dauer einer Einheit in Bruchteilen einer Sekunde:

```
x = std::chrono::milliseconds::period::num; // 1;
x = std::chrono::milliseconds::period::den; // 1000;
```

In der Klasse *milliseconds* ist *period* der Bruch 1/1000, und stellt 1/1000 Sekunden dar. In *hours* ist *period* der Bruch 3600/1: Eine Stunde dauert 3600 Sekunden:

```
x = std::chrono::hours::period::num; // 3600;
x = std::chrono::hours::period::den; // 1;
```

Eine Variable eines *duration*-Typs kann man dann mit einem Wert initialisieren, der die Anzahl der Zeiteinheiten angibt. Diese Anzahl erhält man mit der Elementfunktion

```
constexpr _Rep count() const
```

Beispiel: Variablen eines *duration*-Typs können Zeiträume durch aussagekräftige Namen darstellen:

```
std::chrono::seconds eineHalbeMinute(30); // 30 Sekunden
std::chrono::hours   eineWoche(7*24);     // 7*24 Stunden
```

Da die Konstruktoren von *duration* mit *constexpr* definiert sind, kann man auch Variablen mit *constexpr* definieren und die Werte von Intellisense im Editor anzeigen lassen:

```
constexpr std::chrono::seconds eineHalbeMinute(30); // 30
                                                    Sekunden
constexpr long long c1 = eineHalbeMinute.count(); // 30
```

Bei diesen Beispielen erhält man mit *count* jeweils den bei der Initialisierung angegebenen Wert. Bei den später folgenden Konversionen und arithmetischen Operationen sieht man dann, wie der Wert von *count* angepasst wird.

Mit den im Namensbereich `std::chrono_literals` definierten **Suffixes** „h“ (für *hours*), „min“ (für *minutes*), „s“ (für *seconds*), „ms“ (für *milliseconds*) und „us“ (für *microseconds*) können Literale eines *duration*-Typs noch einfacher angegeben werden. Ein Auszug aus `<chrono>`:

```
constexpr chrono::hours operator "" h(unsigned long long _Val)
{ // return integral hours
  return (chrono::hours(_Val));
}

constexpr chrono::minutes operator "" min(unsigned long long _Val)
constexpr chrono::seconds operator "" s(unsigned long long _Val)
constexpr chrono::milliseconds operator "" ms(unsigned long long
                                                _Val)
constexpr chrono::microseconds operator "" us(unsigned long long
                                                _Val)
```

Beispiel: Die Zeiteinheiten aus dem letzten Beispiel können einfacher so definiert werden:

```
using namespace std::chrono_literals;
std::chrono::seconds eineHalbeMinute=30s; // 30 Sekunden
std::chrono::hours   eineWoche=168h;      // 7*24 Stunden
```

Da der Datentyp eines solchen Literals der entsprechende *duration*-Typ ist, kann man den Datentyp auch vom Compiler mit *auto* ableiten lassen. Das ist die einfachste Form, eine Zeitdauer zu definieren:

```
using namespace std::chrono_literals;
auto eineHalbeMinute = 30s; // 30 Sekunden
auto eineWoche = 168h;      // 7*24 Stunden
```

Für *duration*-Werte sind implizite **Konversionen** definiert, wenn der zugewiesene Wert ohne Verlust dargestellt werden kann. Andernfalls ist eine explizite Konversion mit einem *duration\_cast* möglich. Dabei werden nicht darstellbare Stellen abgeschnitten.

Beispiel: Mit

```
using namespace std::chrono_literals;
std::chrono::milliseconds d1 = 3141ms;
std::chrono::seconds d2 = 18s;
```

ist die implizite Konversion

```
d1 = d2; // d1.count = 18000
```

möglich, da Sekunden ohne Verlust durch Millisekunden dargestellt werden können. Die umgekehrte Konversion wird dagegen vom Compiler zurückgewiesen:

```
d2 = d1; // Fehler
```

Sie kann mit einer expliziten Konversion erzwungen werden:

```
d2 = std::chrono::duration_cast<std::chrono::seconds>(d1);
    // d2.count() = 3
```

Um eine **Zeitdauer als Parameter** zu übergeben, kann man den Datentyp des Parameters in der relativ umständlichen Schreibweise

```
template< class Rep, class Period >
void Sleep(const std::chrono::duration<Rep, Period>& d)
{
    std::this_thread::sleep_for(d); // siehe Abschnitt 17.1.9
}
```

übergeben. Kürzer schreibt sich das mit dem in einer Uhr enthaltenen Typ *duration*:

```
void Sleep(const std::chrono::steady_clock::duration& d)
{
    std::this_thread::sleep_for(d); // siehe Abschnitt 17.1.9
}

void Sleep(const std::chrono::system_clock::duration& d)
{
    std::this_thread::sleep_for(d); // siehe Abschnitt 17.1.9
}
```

Einfacher ist oft eine Zeiteinheit, die alle gewünschten Argumente darstellen kann:

```
void Sleep(const std::chrono::nanoseconds d)
{
    std::this_thread::sleep_for(d); // siehe Abschnitt 17.1.9
}
```

Für *duration*-Ausdrücke sind außerdem die **arithmetischen Operationen** + und - definiert. Dabei können verschiedene Zeiteinheiten kombiniert werden. Der Compiler bestimmt dann einen gemeinsamen Datentyp für die verschiedenen Operanden.

Beispiel: Der Compiler bestimmt einen passenden Datentyp für *r1*:

```
using namespace std::chrono_literals;
auto d1 = 3141ms; // d1.count() = 3141;
auto d2 = 18s;    // d2.count() = 18;
auto r1 = d1 + d2; // Datentyp von r1: milliseconds,
                  // r1.count() = 21141;
```

## 16.3 Datentypen für Zeitpunkte: *time\_point*

Ein Zeitpunkt stellt einen bestimmten Punkt im Lauf der Zeit dar. In der *chrono*-Bibliothek wird ein Zeitpunkt durch eine Anzahl von Zeiteinheiten des Typs *duration* dargestellt, die

auf einer Uhr (z.B. *system\_clock* oder *steady\_clock*, siehe Abschnitt 16.4) seit einem Startzeitpunkt vergangen sind. Dieser Startzeitpunkt wird auch als „epoch“ bezeichnet.

Beispiel: Mit

```
std::chrono::time_point<std::chrono::system_clock,  
                        std::chrono::seconds> t(10s),u;
```

stellt `t` den Zeitpunkt “10 Sekunden nach dem Startzeitpunkt der *system\_clock*“ dar. Mit dem Standardkonstruktor erhält man den Startzeitpunkt. Mit der Funktion *to\_string* (siehe Abschnitt 16.4) wird ein Zeitpunkt als String dargestellt:

```
string s1=to_string(t); //z.B. s1="Thu Jan 1 01:01:40 1970"  
string s2=to_string(u); //z.B. s2="Thu Jan 1 01:00:00 1970"
```

Der String `s2` zeigt, dass der 1. Januar 1970 0 Uhr der Startzeitpunkt ist. Dieser Startzeitpunkt ist bei UNIX und POSIX-Systemen üblich.

Die Uhr und die Zeitdauer werden dem Template als Typ-Argument übergeben. Dieser stark gekürzte Auszug aus `<chrono>`

```
template<class _Clock, class _Duration = typename _Clock::duration>  
    class time_point  
    { // represents a point in time  
public:  
    constexpr time_point(): _MyDur(_Duration::zero()){ } // construct  
                                // with value epoch  
  
    constexpr explicit time_point(const _Duration& _Other):  
        _MyDur(_Other) { } // construct from a duration  
  
private:  
    _Duration _MyDur; // duration since the epoch  
};
```

soll nur zeigen, dass ein Zeitpunkt

- durch eine Uhr und ihren Startzeitpunkt
- durch eine Zeiteinheit des Typs *duration* (z.B. Sekunden) und
- durch die Anzahl der Zeiteinheiten

charakterisiert ist.

Die langen Typnamen können durch ein Alias Template abgekürzt werden.

Beispiel: Mit dem Alias-Template

```
template<typename D>  
    using sys_tp =  
        std::chrono::time_point<std::chrono::system_clock, D>;
```

können Definitionen wie im letzten Beispiel kürzer formuliert werden:

```
sys_tp<std::chrono::seconds> tp1(5s);
sys_tp<std::chrono::milliseconds> tp2 = tp1;
```

**Konversionen** zwischen verschiedenen *time\_point*-Ausdrücken sind implizit möglich, wenn sie nicht mit einem Verlust von Informationen verbunden sind. Andernfalls müssen sie mit *time\_point\_cast* explizit konvertiert werden.

Beispiel: Die folgenden Konversionen sind möglich:

```
sys_tp<std::chrono::seconds> tp1(5s);
sys_tp<std::chrono::milliseconds> tp2 = tp1;
auto tp3 =
    std::chrono::time_point_cast<std::chrono::seconds>(tp2);
```

Diese erhalten die folgenden Werte:

```
int c1 = tp1.time_since_epoch().count(); // 5 Sekunden
int c2 = tp2.time_since_epoch().count(); // 5000
                                         Millisekunden
int c3 = tp3.time_since_epoch().count(); // 5 Sekunden
```

Die folgende Konversion wird dagegen vom Compiler nicht akzeptiert:

```
tp1 = tp2; // Fehler
```

Für *time\_point* Ausdrücke sind diese **arithmetischen Operationen** definiert:

- Zwei Ausdrücke des Typs *time\_point* können nicht addiert, sondern nur subtrahiert werden. Das Ergebnis hat den Typ *duration* und ist die Zeitdauer zwischen den beiden Zeitpunkten.
- Ein Ausdruck des Typs *time\_point* und ein Ausdruck des Typs *duration* können addiert und subtrahiert werden. Das Ergebnis hat den Datentyp *time\_point*.

Beispiel: Die folgenden Operationen sind auch mit Operanden des Typs

```
std::chrono::time_point<std::chrono::system_clock> t1, t2;
```

möglich:

```
std::chrono::time_point<std::chrono::steady_clock> t1, t2;
auto d = t1 - t2; // Datentyp von d: std::chrono::nanoseconds
auto d1 = t1 + d; // Datentyp von d1:
                  std::chrono::time_point<std::chrono::steady_clock>
```

```
auto d2 = t1 - d; // Datentyp von d2:
               std::chrono::time_point<std::chrono::system_clock>
```

## 16.4 Uhren: `system_clock` und `steady_clock`

In der chrono-Bibliothek stehen im Wesentlichen zwei Uhren zur Verfügung.

- **`system_clock`**: Diese stellt die aktuelle Uhrzeit unter Windows dar, wie sie z.B. auf dem Desktop angezeigt wird. Diese ist aber für Laufzeitmessungen nur begrenzt geeignet, da sie vom Benutzer oder z.B. aufgrund der Sommerzeit verstellt werden kann. Sie hat unter Windows oft eine Auflösung von 100 Nanosekunden.
- **`steady_clock`**: Die Uhrzeit dieser Uhr nimmt im Lauf der Zeit immer zu. Sie ist für Laufzeitmessungen geeignet. Sie verwendet unter Windows die Win32-Funktionen `QueryPerformanceCounter` und `QueryPerformanceFrequency` und hat typischerweise eine Auflösung von einer Nanosekunde.

Eine dritte Uhr `high_resolution_clock` ist nach dem C++-Standard ein Synonym für eine dieser beiden. In Visual C++ ist sie ein Synonym für `steady_clock`:

```
using high_resolution_clock = steady_clock;
```

Normalerweise gibt es keinen Grund, `high_resolution_clock` zu verwenden.

Beispiel: Variablen dieser clock-Typen können folgendermaßen definiert werden:

```
std::chrono::system_clock s;
std::chrono::steady_clock c;
```

Die **Auflösung** dieser Uhren kann man mit

```
template <typename Clock>
void display_precision(std::string s)
{
    std::chrono::duration<double, std::nano> ns = Clock::duration(1);
    std::cout << s << " count=" << ns.count() << " ns\n";
}
```

anzeigen. Mit den folgenden Aufrufen dieser Funktion

```
using namespace std::chrono;
display_precision<system_clock>("system_clock ");
display_precision<steady_clock>("steady_clock ");
display_precision<high_resolution_clock>("high_res_clock");
```

sieht man, dass `steady_clock` auf meinem Rechner eine Auflösung von einer Nanosekunde hat:

```

system_clock    count=100 ns
steady_clock    count=1 ns
high_res_clock  count=1 ns

```

Jede dieser Uhren hat eine Funktion

```
static time_point now() noexcept;
```

die die aktuelle Zeit zurückgibt. Hier ist *time\_point* ein in der clock-Klasse definierter Typ:

```

using time_point= chrono::time_point<system_clock>; // in
                                                         system_clock
using time_point= chrono::time_point<steady_clock>; //in steady_clock

```

Ein *time\_point* einer *steady\_clock* stellt einen Zeitpunkt dar, der unabhängig von einer Darstellung als string ist. Es gibt keine Möglichkeit, diesen in einer üblichen Form als String darzustellen. Für einen Zeitpunkt mit einer *system\_clock* ist das aber möglich.

Die Funktion *to\_string* zeigt zwei Varianten, mit denen ein Zeitpunkt als String dargestellt werden kann. Die erste ist ein einfaches Standardformat. Die zweite gibt einen Eindruck von der Vielfalt der Formatierungsmöglichkeiten mit *put\_time*:

```

string to_string(const std::chrono::system_clock::time_point& tp)
{
    std::time_t t = std::chrono::system_clock::to_time_t(tp); //
                                                         convert to system time
    { // Variante 1 - Die #pragmas sind nur in VS 2015 notwendig
      #pragma warning( push )
      #pragma warning(disable : 4996) //_CRT_SECURE_NO_WARNINGS
      return ctime(&t); // This function may be unsafe.
      #pragma warning( pop )
    } // z.B. "Mon Apr 17 21:36:01 2017\n"
    { // Variante 2 - put_time benötigt #include <iomanip>
      std::ostringstream ostr; // #include <sstream>
      #pragma warning( push )
      #pragma warning(disable : 4996) //_CRT_SECURE_NO_WARNINGS
      ostr << std::put_time(std::localtime(&t), "%d.%B %Y %H:%M:%S");
      #pragma warning( pop )
      return ostr.str(); // z.B. "17.April 2017 23:40:57"
    }
}

```

Die Subtraktion kann man insbesondere zur Laufzeitmessung von Anweisungen verwenden. Siehe dazu auch die Klasse *BenchmarkTimer* in Abschnitt 13.4.

Beispiel: Um die Laufzeit einer Funktion *f* zu messen, ruft man vor und nach ihrer Ausführung die Funktion *now* auf. Diese gibt den aktuellen Zeitpunkt zurück (siehe Abschnitt 16.4). Die Differenz dieser beiden Zeitpunkte ist dann die Dauer der Ausführung von *f*.

```

auto start = steady_clock::now();
f(); // Messe die Laufzeit dieser Funktion
auto end = steady_clock::now();
cout << nanoseconds{ end - start }.count() << "ns" << endl;
// 235149457ns

```

Mit einer Konversion in `duration<double>` wird die Zeitdauer als `double`-Wert in Sekunden dargestellt:

```

cout << duration<double>{end - start}.count() << "s" << endl;
// 0.2351494s

```

Eine Konversion in eine andere Einheit ist mit einem `duration_cast` möglich:

```

cout << duration_cast<milliseconds>(end - start).count() <<
"ms" << endl; // 235ms

```

Die Klasse

```

class Stoppuhr {
    std::chrono::steady_clock::time_point Start;
public:
    Stoppuhr() :Start(std::chrono::steady_clock::now()) {};
    void reset() { Start = std::chrono::steady_clock::now(); };
    std::string nach()
    {
        auto End = steady_clock::now();
        auto d = duration_cast<milliseconds>(End - Start);
        return " - nach " + std::to_string(d.count()) + "ms";
        return "verstrichen: " + std::to_string(d.count()) + "ms";
    };
};

```

verwendet dieselben Techniken. Sie wird später gelegentlich verwendet, um die Zeit anzuzeigen, die seit einem Startzeitpunkt vergangen ist.

Beispiel: Führt man zwischen dem Anlegen bzw. dem Aufruf von `reset` und dem Aufruf von `nach` eine Anweisung aus, die zwei Sekunden dauert, gibt `nach` den String "nach 2000ms" zurück.



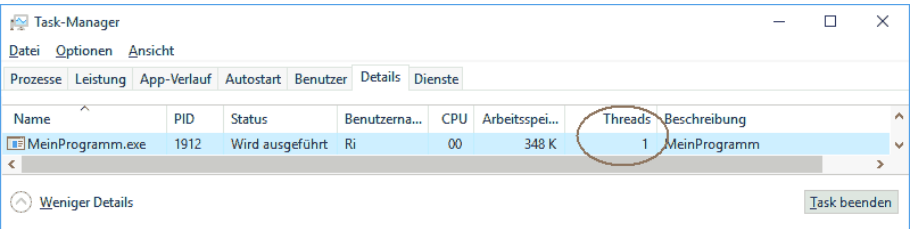
# 17 Multithreading

Mit der seit C++11 nach

```
#include <thread> // ab VS 2012
```

im Namensbereich *std* verfügbaren Klasse *thread* sowie dem Funktions-Template *async* kann man Funktionen als eigene **Threads** starten. Damit werden die Funktionen quasi-parallel auf verschiedenen Prozessoren bzw. Kernen eines Prozessors ausgeführt. Startet man mehrere Funktionen eines Programms als Thread, spricht man auch von Multithreading.

In den bisher entwickelten Programmen wurden die Funktionen ohne die Verwendung der Klasse *thread* gestartet. Diese Programme bestanden dann nur aus einem Thread, außer wenn Systemfunktionen Threads gestartet haben. Die Anzahl der Threads eines Programms wird im Task Manager angezeigt, wenn man unter *Ansicht* die Spalte *Threads* markiert:



Ein Thread stellt eine Folge von Anweisungen dar, der vom Betriebssystem CPU-Zeit zugeteilt werden kann. Damit ein Thread, der auf ein Ereignis wartet (z.B. auf die Eingabe von Daten durch einen Benutzer, auf den Abschluss einer Leseoperation von einer Festplatte bzw. aus einem Netz, auf einen Mutex usw.), keine CPU-Zeit verbraucht, verwaltet das Betriebssystem die Threads in verschiedenen Warteschlangen. Ein Modell mit zwei Warteschlangen ist stark vereinfacht, reicht aber als Hintergrund meist aus:

| Warteschlange      |                                                                                         |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Bereite Threads    | Enthält alle Threads, denen CPU-Zeit zugeteilt werden kann.                             |
| Blockierte Threads | Enthält Threads, denen keine CPU-Zeit zugeteilt wird, weil sie auf ein Ereignis warten. |

Startet man einen Thread, wird er in die Warteschlange der **bereiten Threads** eingefügt. Das Betriebssystem teilt jedem Thread aus dieser Warteschlange nacheinander CPU-Zeit zu (meist eine sogenannte **Zeitscheibe** in der Größenordnung von ca. 20 Millisekunden).

Ein Thread, der auf ein Ereignis wartet, kann **blockiert** werden. Damit ist gemeint, dass er aus der Warteschlange der bereiten Threads entfernt und in die Warteschlange der wartenden Threads eingefügt wird. Sobald das Ereignis eintritt, wird er wieder in die Warteschlange der bereiten Prozesse umgehängt. Vor allem in Abschnitt 17.2.2 werden einige Techniken vorgestellt, mit denen Threads blockiert werden.

Multithreading kann zu schnelleren Ergebnissen eines Programms führen:

- Das gilt bei einem Einprozessor-Rechner vor allem dann, wenn auf zeitaufwendige Ein- und Ausgabeoperationen gewartet werden muss. Ein Programm, das nacheinander auf die Daten von 10 Servern wartet, wird meist länger brauchen, als wenn alle 10 Anfragen in einem jeweils eigenen Thread parallel angefordert werden.
- Bei einem Mehrprozessorrechner (Mehrkern-CPU) kann das Betriebssystem die verschiedenen Threads auf verschiedene Prozessoren verteilen.
- Threads kann man entsprechend ihrer Wichtigkeit eine höhere oder niedrigere **Priorität** geben.

Diese Vorteile bekommt man aber nicht umsonst:

- Das Betriebssystem muss die Threads anlegen (was ca. 100 Mikro-Sekunden dauern kann) und verwalten, was mit einem zusätzlichen Aufwand verbunden ist. Es bringt keinen Vorteil, Funktionen auf Threads zu verteilen, die weniger lang als das Anlegen eines Threads dauern. Das Beispiel am Ende von Abschnitt 17.1.3 zeigt, dass zu viele Threads zu einer Verlangsamung führen können.
- Die Programmierung von Threads kann fehleranfällig und komplizierter sein. Falls die Threads ihre Zugriffe auf gemeinsame Daten nicht synchronisieren, kann das Fehler nach sich ziehen, die nur schwer zu finden sind, weil sie z.B. erst nach einigen Stunden Laufzeit auftreten.

Deswegen sollte man Threads nur verwenden, wenn die Vorteile die Nachteile überwiegen. In diesem Zusammenhang bezeichnet man ein Programm, das in den Hauptspeicher geladen (gestartet) wurde, als **Prozess**. Zu jedem Prozess gehört ein privater Adressraum, Code, Daten usw. Jedes Programm wird mit einem Thread (dem sogenannten primären Thread) gestartet, kann aber weitere Threads erzeugen. Viele Programme bestehen nur aus einem einzigen Thread.

## 17.1 Funktionen als Threads starten

Es gibt im Wesentlichen zwei Möglichkeiten, Funktionen als Threads zu starten: Mit der Klasse *thread* und mit dem Funktions-Template *async*. Diese beiden Möglichkeiten werden in den nächsten beiden Abschnitten 17.1.1 und 17.1.2 zunächst kurz gezeigt. Anschließend folgen dann weitere Details.

*thread* steht nach

```
#include <thread>
```

und *async* nach

```
#include <future>
```

im Namensbereich *std* zur Verfügung. Mit den *using*-Deklarationen

```
using std::thread;
using std::async;
```

kann man sich die Angabe des Namensbereichs sparen.

Im Folgenden wird als Beispiel immer wieder die Funktion

```
long long fibo(int n)
{ // Fibonacci-Zahlen rekursiv berechnen
  if (n <= 0) return 0;
  else if (n == 1) return 1;
  else return fibo(n - 1) + fibo(n - 2);
}
```

verwendet. Diese ist hochgradig ineffizient und braucht sehr viel länger für die Berechnung der Fibonacci-Zahlen als eine iterative Version. Sie ist aber ein einfaches Beispiel für eine zeitaufwendige Funktion, mit der man die Auswirkungen von Multithreading illustrieren kann. Ruft man sie mit entsprechenden Argumenten (je nach Rechner: *n* im Bereich 40 bis 45) auf, dauert ihr Aufruf einige Sekunden oder Minuten.

### 17.1.1 Funktionen mit *async* als Threads starten

Das nach

```
#include <future>
```

im Namensbereich *std* zur Verfügung stehende Funktions-Template

```
template <class F, class... Args>
future<typename result_of<F(Args...)>::type>
async(launch policy, F&&f, Args&&... args);
```

bietet oft die einfachste Möglichkeit, eine Funktion als Thread zu starten. Es kann für einfache Anwendungen sogar ohne ein tieferes Verständnis von *async* und den beteiligten Klassen wie z.B. *future* verwendet werden. Deswegen wird zunächst nur gezeigt, wie man dabei vorgehen kann. Weitere Hintergründe folgen später.

Damit eine Funktion *g* mit *async* als Thread gestartet wird, übergibt man

- als erstes Argument (für den Parameter *policy*) den Wert *std::launch::async*,
- als zweites Argument (für den Parameter *f*) die Funktion *g*, und
- als weitere Argumente die Argumente für die Funktion *g*

Falls die als Thread gestartete Funktion *g* den Rückgabety *R* hat, ist der Rückgabety von *async* der Datentyp *std::future<R>*. Dieser Rückgabewert enthält den Rückgabewert der Funktion *g*. Man erhält ihn mit der Funktion *get*.

Beispiel: Die **globale Funktion** *fibonacci* (siehe Abschnitt 17.1) kann wie in

```
std::future<long long> f42 = async(std::launch::async, fibo,
                                   42);
```

als Thread gestartet werden. Den im Thread berechneten Wert erhält man nach der Fertigstellung des Threads mit

```
long long r42 = f42.get();
```

Den Schreibaufwand kann man mit *auto* noch etwas reduzieren, da der Compiler den Rückgabebetyp von *async* selbst ableiten kann:

```
auto f42 = async(std::launch::async, fibo, 42);
```

Ruft man *async* mit einer Anzahl von Argumenten auf, die keinen gültigen Funktionsaufruf erzeugen

```
auto r = std::async(std::launch::async, fibo); // Fehler:
auto r = std::async(std::launch::async, fibo,1,2); // Fehler:
```

erhält man Fehlermeldungen des Compilers wie etwa

```
// Fehler: keine übereinstimmende überladene Funktion
// Fehler: Funktionsvorlage std::async konnte nicht spezialisiert werden
```

Zum Start einer Elementfunktion ohne Lambda-Ausdrücke ist die relativ grässliche Syntax der Zeiger auf Elementfunktionen notwendig. Die Techniken sind in der Praxis ohne große Bedeutung, da die im nächsten Abschnitt gezeigte Übergabe mit Lambda-Ausdrücken einfacher ist. Das nächste Beispiel hat nur den Zweck, die Vereinfachung mit Lambda-Ausdrücken explizit zu zeigen.

Beispiel: Wäre *fibonacci* eine *public Elementfunktion einer Klasse C*, könnte man sie über ein Objekt *c* der Klasse *C*

```
C c;
```

so starten (analog zu Abschnitt 8.2.14.):

```
auto f1 = std::async(std::launch::async, &C::fibo, &c, 43);
```

In einer Elementfunktion der Klasse *C* übergibt man als Adresse des Objekts den *this*-Zeiger:

```
auto f2 = std::async(std::launch::async, &C::fibo, this, 43);
```

Eine **statische Elementfunktion** *fibonacci* übergibt man ohne Zeiger auf das Objekt, nur mit ihrem Namen:

```
auto f3 = std::async(std::launch::async, C::fibos, 43);
```

Argumente für **Referenzparameter** müssen mit `std::ref` und Argumente für konstante Referenzparameter mit `std::cref` übergeben werden.

Beispiel: Will man die globale Funktion

```
void ref_cref(int& ref, const int& cref)
{
    ref = cref;
}
```

mit

```
int x = 1, y;
auto f = std::async(std::launch::async, ref_cref, x, y);
```

als Thread starten, erhält man eine Fehlermeldung. Mit

```
auto f = std::async(std::la
                                unch::async, ref_cref,
                                std::ref(x), std::cref(y));
```

werden die Argumente richtig übergeben.

Der Aufruf von `async` startet den Thread unmittelbar. Es gibt keine Möglichkeit, eine Thread-Funktion später zu starten (z.B. durch den Aufruf einer Funktion `Start`).

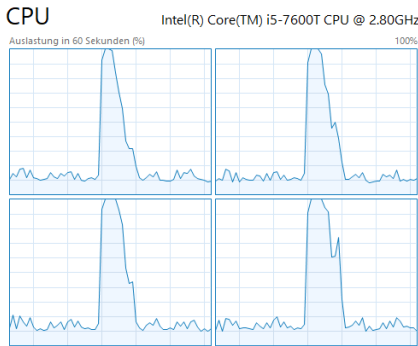
Da ein *thread* unabhängig vom aktuellen Programm ausgeführt wird, muss man auf seine Fertigstellung warten. Durch den Aufruf von `get` wird der aktuelle Thread so lange blockiert (d.h. von der Zuteilung von CPU-Zeit ausgenommen), bis der Thread fertig ist und der Rückgabewert verfügbar ist.

Die **globale Funktion** `fibonacci` (siehe Abschnitt 17.1) kann man wie in

```
void FiboAsync()
{ // die syntaktischen Varianten nur als Beispiel
    std::future<long long> f42 = std::async(std::launch::async, fibo,
                                           42);

    using std::async;
    std::future<long long> f43 = async(std::launch::async, fibo, 43);
    auto f44 = async(std::launch::async, fibo, 44);
    auto f45 = async(std::launch::async, fibo, 45);
    cout << "f42=" << f42.get() << " f43=" << f43.get() << " f44=" <<
         f44.get() << " f45=" << f45.get() << endl;
}
```

in verschiedenen Threads starten. Kompiliert man das Programm im Release-Modus und startet es ohne Debugging auf einem Vierkern-Prozessor, erhält man etwa die CPU-Auslastung

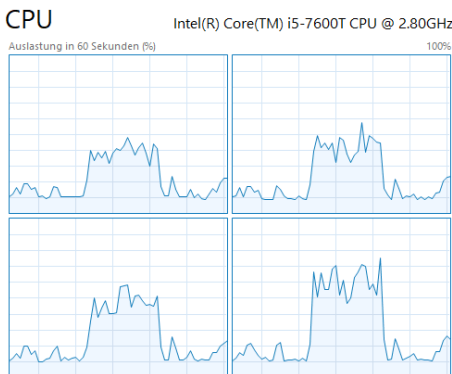


und eine Laufzeit von ca. 11 Sekunden. Das ist etwa die Laufzeit der längsten Funktion bei einer sequenziellen Ausführung.

Führt man diese Anweisungen dagegen sequenziell (d.h. ohne Threads) aus wie in

```
void FiboSequentiell()
{
    long long r1 = fibo(42);
    long long r2 = fibo(43);
    long long r3 = fibo(44);
    long long r4 = fibo(45);
    cout << "Summe: " << r1 + r2 + r3 + r4 << endl;
    // Ohne eine Verwendung der Funktionswerte
} // optimiert der Compiler die Aufrufe von fibo weg
```

wird keiner der Kerne voll ausgelastet:



Die Laufzeit liegt bei etwa 22 Sekunden. Falls Sie überrascht sind, dass hier nicht eine CPU zu 100% ausgelastet ist und alle anderen untätig sind: Windows kann die Arbeit auf verschiedene Prozessorkerne verteilen, damit nicht ein Kern besonders heiß wird. Bei einem 4-Kern Prozessor mit Hyperthreading müssen 8 Prozesse gestartet werden, um eine volle Auslastung zu erreichen.

Im Debug-Modus erhält man übrigens wesentlich längere Laufzeiten: ca. 200 Sekunden für die sequenzielle und ca. 95 Sekunden für die parallele Version. Deswegen sollte man Multithreading-Programme außer zum Debuggen nie im Debug-Modus ausführen.

### 17.1.2 Funktionen mit *thread* als Threads starten

Mit der Klasse *thread* kann man Funktionen als Threads starten. Zum Start einer Funktion kann man einen der Konstruktoren

```
class thread
{
public:
    // ...
    thread() noexcept;
    template <class F> explicit thread(F f);
    template <class F, class ...Args> thread(F&& f, Args&&... args);
    // ...
};
```

verwenden, dem man als erstes Argument die Funktion und danach ihre Argumente übergibt. Da dieser Konstruktor ein variadisches Template (siehe Abschnitt 14.5) ist, passt er zu einer beliebigen Anzahl von Argumenten.

Beispiel: Die globale Funktion (siehe Abschnitt 17.1)

```
long long fibo(int n) { } // siehe oben
```

kann durch

```
thread t1(fibo, 43); // startet fibo(43) als Thread
```

als Thread gestartet werden. Ruft man den *thread*-Konstruktor mit einer Anzahl von Argumenten auf, die keinen gültigen Funktionsaufruf erzeugen

```
thread f1(fibo, 43, 44);
thread f2(fibo);
```

erhält man (wie das für Templates typisch ist) eine Fehlermeldung des Compilers, die nicht für jeden Leser einen Hinweis auf die Ursache des Fehlers gibt:

```
Funktionsvorlage "unknown-type std::invoke(_Callable &&,_Types &&...)"
konnte nicht spezialisiert werden
```

Klickt man diese Fehlermeldung im Fenster *Fehlerliste* an, landet man in einer Datei mit dem Namen *xthread*, deren Anweisungen auch nicht für jeden verständlich sind. Um die Stelle im Quelltext zu finden, in der die Verwendung des Templates einen Fehler verursacht hat, muss man im Fenster *Ausgabe* auf die entsprechende Zeile klicken:

The screenshot shows a C++ IDE with a source file and an output window. The source file contains a function `void start_thread()` that creates a `thread` object `t1` with `fibo` and `43` as arguments. The output window shows a message from `2015.bo0\beispiele\multithreading.h(27)` indicating a note about thread instantiation. Below this, it shows the output of the `Erstellen` (Create) operation: `Erstellen: 0 erfolgreich, 1 fehlerhaft, 0 aktuell, 0 übersprungen =====`.

```

void start_thread()
{
    thread f1(fibo);
    thread t1(fibo, 43); // startet fibo(43) als Thread
}

```

Ausgabe

Ausgabe anzeigen von: Erstellen

2015.bo0\beispiele\multithreading.h(27): notiz: Siehe Verweis auf die Instanziierung der gerade kompilierten Thread-Funktion.

Erstellen: 0 erfolgreich, 1 fehlerhaft, 0 aktuell, 0 übersprungen =====

Die Argumente können auch mit Initialisierungslisten übergeben werden

```
std::thread t3{ fibo, 43 };
```

Der Aufruf des `thread`-Konstruktors startet den Thread unmittelbar. Die Klasse `thread` besitzt (im Gegensatz zu manchen anderen Thread-Bibliotheken) keine Möglichkeit, eine Thread-Funktion später zu starten (z.B. durch den Aufruf einer Funktion `Start`).

Da ein `thread` unabhängig vom aktuellen Programm ausgeführt wird, muss man auf seine Fertigstellung warten. Das ist mit der Elementfunktion

```
void join();
```

möglich. Durch `join` wird der aktuelle Thread so lange blockiert (d.h. von der Zuteilung von CPU-Zeit ausgenommen), bis der Thread fertig ist.

Der Destruktor von `thread` bricht das Programm ab, wenn nicht zuvor `join` aufgerufen wurde. Das heißt, wenn man vergisst, für einen gestarteten Thread `join` aufzurufen, hat das einen Programmabbruch zur Folge.

Die **globale Funktion** `fibo` (siehe Abschnitt 17.1) kann man wie in

```

void FiboParallel()
{
    thread t1(fibo, 42); // startet fibo(42) als Thread
    thread t2(fibo, 43);
    thread t3(fibo, 44);
    thread t4(fibo, 45);
    t1.join(); t2.join(); t3.join(); t4.join();
}

```

in verschiedenen Threads starten. Kompiliert man das Programm im Release-Modus und startet es ohne Debugging auf einem Vierkern-Prozessor, erhält man etwa dieselbe CPU-Auslastung wie in Abschnitt 17.1.1. Stören Sie sich bitte nicht daran, dass mit den bisher vorgestellten Mitteln ein `thread` noch keinen Funktionswert zurückgeben kann. In Abschnitt 17.1.3 wird gezeigt, wie das mit Lambda-Ausdrücken einfach möglich ist.



Wie am Ende von Abschnitt 17.1.1 soll jetzt auch noch an einem Beispiel gezeigt werden, wie man Elementfunktionen ohne Lambda-Ausdrücke an *thread* übergeben kann. Dazu ist die Syntax der Zeiger auf Elementfunktionen notwendig. Mit der im nächsten Abschnitt gezeigten Übergabe mit Lambda-Ausdrücken ist das aber einfacher.

Beispiel: Wäre *fibonacci* eine *public* **Elementfunktion einer Klasse** C, könnte man sie über ein Objekt c der Klasse C so

```
C c;
```

so starten (analog zu Abschnitt 8.2.14.):

```
std::thread t1(&C::fibonacci, &c, 43);
```

In einer Elementfunktion der Klasse C übergibt man als Adresse des Objekts den *this*-Zeiger:

```
std::thread t1(&C::fibonacci, this, 43);
```

Eine **statische Elementfunktion** übergibt man ohne Zeiger auf das Objekt, nur mit ihrem Namen:

```
std::thread t2(&C::fibonacci, 43);
```

Argumente für **Referenzparameter** müssen mit *std::ref* und Argumente für konstante Referenzparameter mit *std::cref* übergeben werden.

Beispiel: Die globale Funktion

```
void ref_cref(int& ref, const int& cref) {}
```

kann man so starten:

```
thread t(ref_cref, std::ref(x), std::cref(y));
```

### 17.1.3 Lambda-Ausdrücke als Threads starten

Um eine Funktion einer beliebigen Art (eine globale, statische oder nicht statische, ein Funktionsobjekt usw.) an einen *thread* oder *async* zu übergeben, verwendet man am einfachsten Lambda-Ausdrücke. Alle anderen Techniken (insbesondere die von Abschnitt 17.1.2), sind meist umständlicher und zum Teil mit einigen syntaktischen Verrenkungen verbunden.

Dazu übergibt man dem *thread*-Konstruktor einen Lambda-Ausdruck mit einer leeren Parameterliste und ruft die Funktion, die im Thread ausgeführt werden soll, im Anweisungsteil des Lambda-Ausdrucks auf. Parameter und Rückgabewerte übergibt man in der Erfassungsliste.

Beispiel: In

```

void ThreadsMitLambdas()
{
    long long f42 = 0, f43 = 0, f44 = 0, f45 = 0;
    // Beispiel 1:
    std::function<void(void)> f = [&f42]() {f42 = fibo(42); };
    thread t1(f) ; // startet fibo(42) als Thread
    // Beispiel 2:
    auto Lambda = [&f43]() { f43 = fibo(43); };
    thread t2(Lambda);
    // Beispiel 3:
    thread t3([&f44]() {f44 = fibo(44); });
    // Beispiel 4:
    thread t4([&f45]{f45 = fibo(45); });
    t1.join(); t2.join(); t3.join(); t4.join();
    cout << "f42=" << f42 << " f43=" << f43 << "f44=" << f44
        << "f45=" <<f45<<endl;
}

```

soll das erste Beispiel (mit *f42*) nur explizit zeigen, dass dem Thread *t1* eine Funktion mit dem Rückgabtyp *void* und einer leeren Parameterliste übergeben wird.

Die Beispiele 2 und 3 (mit *f43* und *f44*) sollen explizit zeigen, wie ein Lambda-Ausdruck übergeben wird.

Da alle diese Lambda-Ausdrücke eine leere Parameterliste haben, kann man () wie in Beispiel 4 auch weglassen. Diese Schreibweise wird beim Start von *thread*-Funktionen üblicherweise verwendet.

Im nächsten Beispiel werden dieselben Arten von Elementfunktionen (statische und nicht statische) wie im vorletzten Beispiel von Abschnitt 17.1.2 mit Lambda-Ausdrücken aufgerufen. Offensichtlich ist das deutlich einfacher, da man nicht die Syntax der Zeiger auf Elementfunktionen verwenden muss.

Beispiel: Die Elementfunktionen der Klasse

```

class C {
    int m_;
public:
    C(int m) :m_(m) {}
    static string fs(int n)
    {
        return " statische Elementfunktion,
                n="+std::to_string(n) ;
    }

    string f(int n) {
        return " Elementfunktion, n=" + std::to_string(n);
    }
};

```

werden in *t1*, *t2* und *t3* aufgerufen. Das Objekt, über das eine nicht statische Elementfunktion übergeben wird, kann wie in *t2* im Lambda-Ausdruck erzeugt werden. Dann müssen die Konstruktor-Argumente in der Erfassungsliste übergeben werden. Oder das Objekt wird außerhalb des Lambda-Ausdrucks erzeugt und dann als Referenz in der Erfassungsliste übergeben:

```
void LambdasMitElementfunktionen(int n)
{
    string r1, r2, r3;
    thread t1([&r1] {r1 = C::fs(43); }); // statische
                                     Elementfunktion
    thread t2([&r2,n] {C c(n); r2 = c.f(44); });
    C c(n);
    thread t3([&r3, &c] {r3 = c.f(44); });
    t1.join(); t2.join(); t3.join();
}
```

Es ist nicht möglich, ein Objekt in der Erfassungsliste als Wert zu übergeben und dann eine Elementfunktion aufzurufen,

```
thread t3([&r3, c] { r3 = c.f(44); }); // Fehler: const ...
```

außer man gibt nach der Parameterliste *mutable* an:

```
thread t3([&r3, c]() mutable { r3 = c.f(44); });
```

Aber da ist *&c* in der Erfassungsliste doch wieder einfacher.

Einen Lambda-Ausdruck kann man auch an *async* übergeben. Dabei muss man den Lambda-Ausdruck nach dem *launch*-Argument angeben:

```
void AsyncWithLambdas()
{
    std::future<long long> fut43 = std::async(std::launch::async, []
                                           { return fibo(43); });
    auto fut44 = std::async(std::launch::async, [] { return fibo(44);
                                                    });
    long long f43 = { fut43.get() }, f44 = { fut44.get() };
    std::cout << "fib(43)=" << f43 << " fib(44)=" << f44 <<std::endl;
}
```

*thread*-Objekte kann man auch in einem Array oder in einem Container anlegen. Diese kann man in einer Schleife füllen. Auch auf die Fertigstellung der Threads kann man in einer Schleife warten:

```
void Array_of_threads()
{
    const int nt = 20;
    thread t[nt];
    long long result[nt];
```

```

for (int i = 0; i < nt; i++)
    t[i] = thread([i, &result] {result[i] = fibo(10 + i % 3); });
for (int i = 0; i < nt; i++)
    t[i].join();
for (int i = 0; i < nt; i++)
    std::cout << " result[i]=" << result[i];
std::cout << std::endl;
}

void vector_of_threads(int n)
{
    vector<thread> vt;
    vector<long long> result;
    for (int i = 0; i < n; i++)
        vt.push_back(thread([i, &result] {result.push_back(fibo(10 + i
                                                                % 3)); }));

    for (auto& i : vt) { i.join(); }
    for (auto& r : result) { std::cout << " result[i]=" << r; }
    std::cout << std::endl;
}

```

Offensichtlich ist es einfach, 100 oder 1000 Threads zu starten. Das bedeutet aber nicht, dass das auch sinnvoll ist. Die nächste Tabelle enthält die Laufzeiten für die Berechnung einer Summe von  $n=1000000$  Werten, wobei die Berechnung der Teilsummen auf  $N$  Threads verteilt wird (bei 2 Threads die Summe der ersten  $n/2$  Werte in einem ersten und die Summe der zweiten  $n/2$  Werte in einem zweiten Thread):

```

double SummeGeomReihe(int von, int bis, double a, double q)
{ // result = a*q^von + a*q^(von+1) + ... + a*q^(bis-1)
  double result = 0;
  for (int i = von; i < bis; i++)
      result = result + a*std::pow(q, i);
  return result;
}

double SummiereGeomReiheParallel(int n, int nThreads)
{ // result = a*q^von + a*q^(von+1) + ... + a*q^(bis-1)
  double a = 0.8, q = 0.8, result = 0;
  if (nThreads == 0)
      return SummeGeomReihe(0, n, a, q);
  else
  {
      vector<double> r(nThreads);
      vector<thread> t(nThreads);
      int nnT = n / nThreads;
      for (int i = 0; i < nThreads; i++)
          t[i] = thread([&] {r[i] = SummeGeomReihe(i*nnT, (i + 1)*nnT, a,
                                                       q); });

      for (int i = 0; i < nThreads; i++)
          t[i].join();
  }
}

```

```

    for (int i = 0; i < nThreads; i++)
        result += r[i];
}
return result;
}

```

Mit einem Vierkern-Prozessor wurden die folgenden Laufzeiten gemessen:

| Benchmarks Visual Studio 2019.4 x64 Release, Laufzeit in Millisekunden |             |             |             |             |             |              |               |       |        |
|------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|---------------|-------|--------|
|                                                                        | <i>N</i> =0 | <i>N</i> =1 | <i>N</i> =2 | <i>N</i> =3 | <i>N</i> =4 | <i>N</i> =10 | <i>N</i> =100 | 1000  | 10.000 |
| <i>thread</i>                                                          | 7 ms        | 7 ms        | 3,5 ms      | 2,4 ms      | 2,0 ms      | 2,5 ms       | 6,7 ms        | 56 ms | 560 ms |

Offensichtlich ist dieses CPU-intensive Programm dann am schnellsten, wenn die Anzahl der Threads etwa der Anzahl der Prozessorkerne entspricht. Bei einer großen Anzahl von Threads dauert das Anlegen der Threads länger als die Zeitersparnis durch die parallele Ausführung. Dann kann ein Programm ohne Threads (Spalte *N*=0) schneller sein als eines mit vielen Threads (Spalte *N*=1000). Bei IO-intensiven Programmen (die vor allem Daten von einer Festplatte oder einem Netz lesen bzw. schreiben) kann auch eine wesentlich höhere Anzahl von Threads sinnvoll sein. Die Anzahl der Prozessorkerne kann man mit `thread::hardware_concurrency` bestimmen (siehe Abschnitt 17.1.8).

### Aufgabe 17.1.3

1. Mit dieser Aufgabe soll mit den Funktionen `f1`, ..., `f6` (die alle ziemlich sinnlos sind) vor allem die Syntax geübt werden.

```

string f1(int x) { return std::to_string(x); }
int f2(int x, std::string y, int z) { return x + std::stoi(y) +
                                     z; }

void f3(int& i) { i = i + 1; }
int f4(const string& s) { return s.length(); }

class C {
public:
    int f5(int x) { return x + 1; }
    static int f6(int x) { return x + 1; }
};

```

Starten Sie diese Funktionen mit Argumenten Ihrer Wahl als Thread und weisen Sie die Rückgabewerte einer Variablen zu, indem Sie

- a) diese Funktionen an `thread` übergeben und keine Lambda-Ausdrücke verwenden
- b) diese Funktionen an `async` übergeben und keine Lambda-Ausdrücke verwenden
- c) in a) Initialisierungslisten verwenden (d.h. `{}` statt `()`)

- d) diese Funktionen an *thread* übergeben und Lambda-Ausdrücke verwenden
- e) diese Funktionen an *async* übergeben und Lambda-Ausdrücke verwenden

### 17.1.4 Zuweisungen und *move* für Threads

Die Klasse *thread* enthält keinen Kopierkonstruktor und keinen Zuweisungsoperator für L-Werte, sondern nur entsprechende Operationen für R-Werte:

```
class thread {
    ...
    thread(const thread&) = delete;
    thread(thread&&) noexcept;
    thread& operator=(const thread&) = delete;
    thread& operator=(thread&&) noexcept;
    ...
};
```

Deshalb kann einem Thread nur ein R-Wert Thread zugewiesen werden, aber kein L-Wert. Entsprechendes gilt auch für eine Initialisierung. Dabei darf der Thread, an den die Zuweisung erfolgt, kein Thread sein, der gerade eine Funktion ausführt (d.h. *joinable* muss *false* zurückgeben, siehe Abschnitt 17.1.8). Sonst ist ein Programmabbruch die Folge.

Beispiel: In diesem und im nächsten Beispiel wird eine Funktion *f* wie z.B.

```
void f() {};
```

verwendet. Damit ist diese Zuweisung an *t* zulässig:

```
thread t;          // t führt keine Funktion aus
t = thread(f);     // thread(f) ist ein R-Wert
```

Die nächste Zuweisung führt zu einem Programmabbruch, da *t* vor der Zuweisung eine Funktion ausführt:

```
thread t(f);       // t führt eine Funktion aus
t = thread(f);     // Laufzeitfehler
```

Die Zuweisung eines L-Werts wird vom Compiler unterbunden:

```
thread t1;
thread t2(f);
t1 = t2;           // Fehler: operator= delete
```

Mit *move* erhält man einen R-Wert:

```
thread t1;
thread t2(f);
t1 = std::move(t2); // die rechte Seite ist ein R-Wert
t1.join();          // t1.join(), da verschoben - nicht t2.join()
```

Da *swap* intern *move* verwendet, hat man damit dieselben Möglichkeiten:

```

thread t1;
thread t2(f);
std::swap(t1, t2); // das geht auch
t1.join(); // t1.join(), da vertauscht - nicht t2.join()

```

Deswegen können Threads auch nicht mit dem Algorithmus `std::copy` von einem Container in einen anderen kopiert werden, sondern nur mit `std::move`. Da die Container-*push\_back* Funktion in C++11 um R-Wert Referenzparameter erweitert wurde, kann ein *thread* mit *push\_back* in einen Container eingefügt werden. Mit *emplace* bzw. *emplace\_back* wird der Thread aus den Argumenten konstruiert.

Beispiel: Die *copy*-Anweisung wird vom Compiler nicht akzeptiert:

```

std::vector<thread> v1, v2;
v1.push_back(thread(f));
v1.emplace_back(f);
//copy(v1.begin(), v2.end(), std::back_inserter(v2)); // Fehler
move(v1.begin(), v1.end(), std::back_inserter(v2));

```

### 17.1.5 Die Klassen *future* und *promise*

Mit der nach

```
#include <future>
```

verfügbaren Klasse *future* kann man entweder einen Wert oder eine Exception aus einem Thread an einen anderen Thread übergeben. Meist verwendet man ein *future*, um das Ergebnis aus einem Thread *t* an den Thread übergeben, der *t* gestartet hat. Der Name *future* soll zum Ausdruck bringen, dass der Wert eventuell erst in der Zukunft verfügbar ist. Das heißt: Ruft man *get* auf, ohne dass die Anweisungen in *t* schon fertig sind, wartet der aufrufende Thread so lange, bis *t* fertig ist.

Dieser Auszug aus dem C++-Standard

```

template <class R>
class future
{
public:
    future() noexcept;
    future(const future& rhs) = delete;
    future& operator=(const future& rhs) =
        delete;
    R future::get();
};

```

enthält nur die Elemente, die für ein grundlegendes Verständnis von *future* notwendig sind.

Im Klassen-Template *future* steht R für den Datentyp des übergebenen Wertes. Falls das Typ-Argument für R nicht *void* ist, kann das *future* einen Wert des Typs R oder eine Exception darstellen. Mit dem Typ-Argument *void* kann das *future* nur eine Exception darstellen.

Beispiel: Ein *future*-Objekt mit dem Typargument *int* kann entweder einen *int*-Wert oder eine Exception darstellen:

```
std::future<int> fi;
```

Ein *future*-Objekt mit dem Typargument *void* kann nur eine Exception darstellen, aber keinen Wert:

```
std::future<void> fv;
```

Der Wert oder die Exception in einem *future* wird meist in einem anderen Thread gesetzt. Das ist **nur** mit Objekten der Klassen *promise* und *packaged\_task* sowie mit der Funktion *async* möglich. Die Klasse *future* selbst hat keine Elementfunktion dafür. In einem *promise* stehen dafür Funktionen wie

```
void set_exception(exception_ptr p);
void promise::set_value(const R& r); // außerdem mit R&& r und R& r
void promise<void>::set_value();
```

zur Verfügung, die in Abschnitt 17.1.6 noch genauer vorgestellt werden. Die *async*-Funktionen (siehe Abschnitt 17.1.1 und 17.1.7) starten eine Funktion als Thread und geben ihren Rückgabewert oder eine in der Funktion ausgelöste Exception in dem *future* zurück, das von *async* zurückgegeben wird.

Beispiel: Die in Abschnitt 17.1.6 noch genauer beschriebene Funktion *throw\_0* löst für bestimmte Argumente eine Exception aus und gibt für andere Argumente einen *int*-Wert zurück. Die folgenden Anweisungen sollen nur zeigen, wie die Werte des *future*-Objekts mit einem *promise* in einem anderen Thread gesetzt werden:

```
std::promise<int> p; // außerhalb des Threads
thread t = thread([&] {
    try {
        int result = throw_0(17);
        p.set_value(result);
    }
    catch (...) // ... !!!
    {
        p.set_exception(std::current_exception()); // die
                                                    aktuelle Exception
    }
});
```

Durch den in Abschnitt 17.1.1 vorgestellten Aufruf von *async*

```
std::future<long long> f42 = async(std::launch::async, fibo,
                                   42);
```



wird in das zurückgegebene *future*-Objekt *f42* der Rückgabewert *fibo(42)* oder eine von *fibo* ausgelöste Exception eingetragen.

Das *future* zu einem *promise* erhält man mit der *promise*-Elementfunktion

```
future<R> get_future();
```

Den Wert in einem *future* erhält man mit der Elementfunktion *get*. Falls der Wert den Datentyp *R*& bzw. *void* hat, ist *get* folgendermaßen definiert:

```
R& future<R&>::get();  
void future<void>::get();
```

Falls ein *future* keinen Wert, sondern eine Exception enthält, wird diese durch den Aufruf von *get* erneut ausgelöst. Deswegen muss man **get in einem try-Block aufrufen**, falls eine Exception auftreten kann.

Beispiel: Die Werte aus den futures des letzten Beispiels erhält man so:

```
try {  
    cout << "Ergebnis =" << p.get_future().get() << endl;  
}  
catch (std::future_error& fe)  
{  
    cout << "code=" << fe.code() << " what()=" << fe.what()  
        << endl;  
}  
  
try {  
    cout << "Ergebnis =" << f42.get() << endl;  
}  
catch (std::future_error& fe)  
{  
    cout << "code=" << fe.code() << " what()=" << fe.what()  
        << endl;  
}  
}
```

Falls das Ergebnis beim Aufruf von *get* noch nicht vorliegt, wird der Thread, der *get* aufruft, so lange blockiert (d.h. nicht mehr bei der Zuteilung von CPU-Zeit berücksichtigt), bis das Ergebnis vorliegt. Sobald das Ergebnis im Thread gesetzt wird, wird dem Thread wieder CPU-Zeit zugeteilt.

Beim Aufruf von *get* muss der Thread nicht mit *lock* oder einer ähnlichen Operation synchronisiert werden. Sowohl *get* als auch *get\_future* dürfen **nur ein einziges Mal** aufgerufen werden. Ab ihrem zweiten Aufruf wird eine Exception des Typs *future\_error* ausgelöst.

*future*-Objekte sind in gewisser Weise die andere Seite von *promise* bzw. *async*: Werte oder Exceptions, die mit *promise* bzw. *async* in einem Thread gesetzt werden, werden mit einem *future* abgeholt. Das Besondere ist dabei, dass diese in verschiedenen Threads verwendet werden und diese Threads zeitlich entkoppelt sind. Der Thread, der *get* aufruft, wartet so

lange, bis ein anderer Thread einen Wert oder eine Exception mit *promise* bzw. *async* zur Verfügung stellt.

Die wichtigsten Elemente der nach

```
#include <future>
```

verfügbaren Klasse *promise* sind:

```
template <class R>
class promise {
public:
    promise();
    promise(const promise& rhs) = delete;
    promise& operator=(const promise& rhs) = delete;
    void swap(promise& other) noexcept;
    future<R> get_future();
    void set_value(see below );
    void set_exception(exception_ptr p);
```

Die Funktionen *get\_future*, *set\_value* und *set\_exception* wurden schon zusammen mit *future* und *async* vorgestellt: Mit *get\_future* erhält man das zugehörige *future*. Diese Funktion darf nur ein einziges Mal aufgerufen werden. Ab ihrem zweiten Aufruf wird eine Exception des Typs *future\_error* ausgelöst.

Die Namen „future“ und „promise“ wurden oft als verwirrend und nicht aussagekräftig kritisiert. Diese Klassen werden meist so eingesetzt, dass ein *promise* von einem Produzenten einer asynchronen Operation verwendet wird, und ein *future* von einem Konsumenten.

Beispiel: Die folgenden Anweisungen zeigen das Zusammenspiel von *promise* und *future* knapp und prägnant. Ein von einem Thread ausgeführter Produzent legt einen Wert in einem *promise* ab:

```
std::promise<int> p;
std::thread producer([&] {p.set_value(17); });
```

Ein von einem anderen Thread ausgeführter Konsument holt den Wert mit *get* aus dem *future*-Objekt des *promise* ab:

```
std::future<int> f = p.get_future();
std::thread consumer([&] {std::cout << f.get(); });

producer.join();
consumer.join();
```

### 17.1.6 Exceptions in Threads und ihre Weitergabe mit *promise*

Falls in einem Thread eine Exception ausgelöst und nicht abgefangen wird, führt das zu einem Programmabbruch.

Beispiel: Startet man die Funktion

```
int throw_0(int n)
{
    if (n == 0)
        throw(std::runtime_error("throw_0, n==0"));
    return n;
}
```

mit dem Argument 0 als Thread

```
thread t(throw_0, 0); // oder thread t([] {throw_0(0); });
t.join();
```

führt das zu einem Programmabbruch. Dieser Programmabbruch wird auch nicht dadurch vermieden, dass *thread* in einem *try*-Block aufgerufen wird:

```
void Crash(int n)
{
    try {
        thread t(throw_0, 0); // oder thread t([] {throw_0(0); });
    };
    t.join(); // dieses join wird bei einer Exception nicht
              erreicht
}
catch (...) {}; // ignoriere die Exception
}
```

Fängt man die Exception dagegen im Thread ab, wird das Programm ordnungsgemäß ausgeführt. Deswegen sollte jede von *thread* gestartete Funktion alle Exceptions abfangen.

Beispiel: Startet man die Funktion

```
int catch_0(int n)
{
    try { n = throw_0(n); }
    catch (...) {} // ignoriere die Exception
    return n;
}
```

mit dem Argument 0 als Thread, wird das Programm nicht abgebrochen.

Normalerweise will man auf eine Exception aber nicht im Thread, sondern außerhalb in einer Funktion reagieren, die den Thread gestartet hat. Das ist mit einem *promise*-Objekt möglich. Damit kann man nicht nur wie im letzten Abschnitt einen Wert, sondern auch eine Exception weitergeben. Bei der Definition eines *promise*-Objekts gibt man den Datentyp des Wertes, der zurückgegeben werden soll, als Typargument an. Will man keinen Wert zurückgeben, verwendet man das Typargument *void*.

Beispiel: Für eine Funktion mit dem Rückgabotyp *int* verwendet man ein *promise*-Objekt wie *pi*, und für den Rückgabotyp *void* eines wie *pv*. Ein solches Objekt wird außerhalb des Threads definiert:

```
std::promise<int> pi;
std::promise<void> pv;
```

Beim Aufruf einer Funktion gibt es zwei Möglichkeiten: Entweder tritt eine Exception auf oder nicht. Falls die Funktion in einem Thread ausgeführt wird, kann man dann folgendermaßen vorgehen:

- a) Falls eine Exception auftritt, wird diese durch

```
std::current_exception()
```

dargestellt und mit der *promise*-Elementfunktion (das ist eine atomare Operation)

```
void set_exception(exception_ptr p);
```

in das zum *promise*-Objekt gehörende *future*-Objekt eingetragen. Hier ist *exception\_ptr* ist ein spezieller Datentyp, der eine beliebige Exception darstellen kann. Da *current\_exception* beliebige Exceptions darstellen kann, verwendet man sie in einem Exception-Handler *catch(...)*. Dieser passt zu allen Exceptions.

- b) Falls keine Exception auftritt, wird der Rückgabewert der Funktion mit einer der *set\_value*-Funktionen:

```
void promise::set_value(const R& r); // außerdem mit R&& r und R& r
void promise<void>::set_value();
```

eingetragen. Der Aufruf von *set\_value* ist auch beim Rückgabotyp *void* notwendig.

Achtung: Es **muss genau eine** der beiden Funktionen aufgerufen werden, also entweder nur *set\_exception* oder nur eine der *set\_value*-Funktionen, aber nicht beide, und auch nicht keine der beiden.

Wenn man das Ergebnis oder die Exception dann wie unter a) oder b) in ein *promise*-Objekt *p* einträgt, **muss** nach dem Start des Threads die Funktion *get\_future().get()* des *promise*-Objekts aufgerufen werden:

```
p.get_future().get(); // promise p;
```

*get\_future* gibt das *future*-Element zurück. Falls in das *promise*-Objekt ein Wert eingetragen wurde (mit einer der *set\_value*-Funktionen), gibt *get()* diesen Wert zurück. Wurde dagegen eine Exception eingetragen, wird durch *get()* ein *rethrow\_exception* ausgeführt, das diese Exception erneut auslöst. Deswegen muss dieser Aufruf in einem *try*-Block erfolgen.

Das nächste Beispiel zeigt diese Vorgehensweise.

Beispiel: Startet man eine Funktion, die wie *throw\_0* (siehe oben) eine Exception auslösen kann, in einem Thread, nimmt man diese im Thread in einen *try*-Block auf. Ihren

Rückgabewert übergibt man dann nach dem Aufruf mit `set_value` an das *promise*-Objekt. Im Exception-Handler übergibt man die aktuelle Exception `current_exception()` mit `set_exception` an das *promise*-Objekt.

```
void Exception_in_Threads(int n)
{
    std::promise<int> p; // außerhalb des Threads
    thread t = thread([&p,n] {
        try {
            int result = throw_0(n);
            p.set_value(result); // b)
        }
        catch (...) // ... !!!
        {
            p.set_exception(std::current_exception()); // a)
        }
    });

    try {
        cout << "result=" << p.get_future().get() << endl;
    }
    catch (std::exception& ex)
    {
        cout << "Exception: " << ex.what() << endl;
    }
    t.join();
}
```

Beim Aufruf mit `n==0` erhält man die Meldung

```
Exception: throw_0, n==0
```

und beim Aufruf mit dem Wert 2

```
result=2
```

Die Funktion, bei der eine Exception auftreten kann, kann man an *thread* nicht nur mit einem Lambda-Ausdruck übergeben, sondern auch als Funktion. Das führt aber zu einer umständlicheren Vorgehensweise als mit einem Lambda-Ausdruck:

- Da ein *promise*-Objekt entweder eine Exception oder ein Ergebnis enthalten muss, muss man auch das Ergebnis in das *promise* eintragen. Die an *thread* übergebene Funktion muss dann *void* zurückgeben.
- Damit das *promise*-Objekt Werte aus der Funktion übergeben kann, muss es als Referenzparameter übergeben werden und beim Aufruf das Argument mit `std::ref`

Das nächste Beispiel ist deshalb nicht als Empfehlung gedacht. Es wurde nur aufgenommen, um vor dieser naheliegenden Vorgehensweise abzuraten und um einige Hintergründe zu verdeutlichen.

Beispiel: Bei der Übergabe von

```
void promise_als_Parameter(int n, std::promise<int>& p) //
                                                    umständlich
{ // Rückgabetyyp void, da Rückgabe in p
  try {
    n = throw_0(n); // das Ergebnis
    p.set_value(n);
  }
  catch (...) // ... !!!
  {
    p.set_exception(std::current_exception()); // #include
                                                    <exception>
  }
}
```

an *thread* muss das *promise*-Argument mit *std::ref* übergeben werden:

```
std::promise<int> p;
thread t(promise_als_Parameter, n, std::ref(p)); // p
                                                    anstelle std::ref(p)
t.join(); // ist ein Fehler
```

Das *promise* p kann man dann so verwenden:

```
try {
  int result = p.get_future().get(); // damit eine
                                      Exception weitergegeben wird.
  cout << "result=" << result << endl;
}
catch (const std::exception& e)
{
  cout << "Exception e: " << e.what() << endl;
}
```

### Aufgabe 17.1.6

1. Die Funktion *throw\_0* soll wie im Text mit dem Argument 0 eine Exception auslösen. Beschreiben Sie den Programmablauf für jeden der Aufrufe von

```
void parallel(std::function<void()> f1, std::function<void()> f2)
{
  thread t{ f1 }; // starte f1 in einem neuen thread
  f2();           // starte f2 in diesem thread
  t.join();       // warte auf f1
}
```

beim Aufruf von *Exception\_Aufgabe\_1* mit den Argumenten 1 bis 4:

```

void Exception_Aufgabe_1(int p)
{
    if (p == 1) parallel([] {throw_0(1); }, [] {throw_0(1); });
    if (p == 2) parallel([] {throw_0(1); }, [] {throw_0(0); });
    if (p == 3) parallel([] {throw_0(0); }, [] {throw_0(1); });
    if (p == 4) parallel([] {throw_0(0); }, [] {throw_0(0); });
}

```

### 17.1.7 Der Programmablauf mit *async*

Mit dem Funktions-Template *async* kann man eine Funktion (oder einen Lambda-Ausdruck oder ein Funktionsobjekt) in einem eigenen Thread starten (siehe Abschnitt 17.1.1). Das Ergebnis der Funktion wird dann in einem *future*-Objekt zurückgegeben:

```

template <class F, class... Args>
future<typename result_of<F(Args...)>::type>
async(F&& f, Args&&... args);

template <class F, class... Args>
future<typename result_of<F(Args...)>::type>
async(launch policy, F&& f, Args&&... args);

```

Normalerweise wählt man die zweite Variante und übergibt als erstes Argument ***launch::async***. Anstelle von *launch::async* ist auch noch der Wert ***launch::deferred*** zulässig. Diese Werte bewirken:

- ***launch::async***: Die als zweites Argument übergebene Funktion wird mit dem Start von *async* gestartet.
- ***launch::deferred***: Die als zweites Argument übergebene Funktion wird beim Aufruf von *get* gestartet.

Die erste Variante von *async* (ohne den *launch policy* Parameter) erlaubt dem Compiler, die launch policy auszuwählen. In Visual C++ hat kein policy Parameter denselben Effekt wie die zweite mit *launch::async*. Bei anderen Compilern kann das anders sein. Deshalb empfiehlt es sich, immer eine launch policy anzugeben. Meist ist das *launch::async*.

Die Funktion und ihre Argumente werden wie bei *thread* anschließend übergeben.

Der Rückgabewert von *async* ist ein *future*-Objekt, das entweder den Funktionswert enthält, sobald er verfügbar ist, oder eine Exception, die in der von *async* gestarteten Funktion ausgelöst wird. Den Rückgabewert des *future*-Objekts erhält man mit der Elementfunktion *get*.

- Falls die Funktion beim Aufruf von *get* noch nicht mit der Berechnung fertig ist, wartet *get* bis sie fertig ist.
- Falls beim Aufruf der Funktion eine Exception aufgetreten ist, wird diese beim Aufruf von *get* erneut ausgelöst. Deswegen muss man ***get* in einem *try*-Block aufrufen**, falls eine Exception auftreten kann.

In den folgenden Beispielen wird zur Veranschaulichung des Ablaufs immer wieder die Funktion

```

int arbeite(string Aufgabe, int n) // n Sekunden
{
    cout << "Wir arbeiten daran: " << Aufgabe << endl;
    if (n <= 0)
        throw std::runtime_error(Aufgabe + ", n<=0 in 'arbeite'");
    Sleep(seconds(n)); // blockiere den Thread n Sekunden, siehe
                        // Abschnitt 17.1.9
    return n;
}

```

gestartet. Diese löst mit einem Argument  $\leq 0$  eine Exception aus, und wartet mit einem positiven Argument  $n$  Sekunden. Mit der Elementfunktion *nach* der Klasse *Stoppuhr* (siehe Abschnitt 16.3) wird dann die bis zum aktuellen Zeitpunkt verstrichene Zeit angezeigt.

Beispiel: Startet man die Funktion *arbeite* zweimal mit *async* und wie in

```

void async_zwischendurch_was_anderes_tun()
{
    Stoppuhr t; // siehe Abschnitt 16.3
    std::future<int> f1 = std::async(std::launch::async,
                                   arbeite, "Aufgabe 1", 3);
    std::future<int> f2 = std::async(std::launch::async,
                                   arbeite, "Aufgabe 2", 7);
    cout << "Inzwischen arbeiten wir etwas anderes ..." <<
                                                endl;
    Sleep(5s); // In Wirklichkeit geschlafen und nicht
               // gearbeitet
    cout << "Andere Arbeit fertig" << t.nach() << endl;
    try {
        int r1 = f1.get();
        string v1 = t.nach();
        int r2 = f2.get();
        string v2 = t.nach();
        cout << "Ergebnis 1: " << r1 << v1 << " Ergebnis 2: "
              << r2 << v2 << endl;
    }
    catch (const std::exception& e)
    {
        cout << "Exception e: " << e.what() << endl;
    }
}

```

erhält man eine Ausgabe wie

```

Inzwischen arbeiten wir etwas anderes ...
Wir arbeiten daran: Aufgabe 2
Wir arbeiten daran: Aufgabe 1
Andere Arbeit fertig - nach 5003ms
Ergebnis 1 : 3 - nach 5005ms Ergebnis 2 : 7 - nach 7003ms
Jetzt ist alles fertig!- nach 7006ms

```



Hier sieht man, dass die beiden Aufgaben 1 und 2 parallel zu der anderen Aufgabe abgearbeitet werden.

Mit dem *policy*-Argument *std::launch::deferred* wird die übergebene Funktion erst beim Aufruf von *get* gestartet.

Beispiel: Ersetzt man das *policy*-Argument im letzten Beispiel durch *launch::deferred*

```
auto f1 = std::async(std::launch::deferred, arbeite,
                    "Aufgabe 1", 3);
auto f2 = std::async(std::launch::deferred, arbeite,
                    "Aufgabe 2", 7);
```

erhält man diese Ausgabe:

```
Inzwischen arbeiten wir etwas anderes ...
Andere Arbeit fertig - nach 5001ms
Wir arbeiten daran: Aufgabe 1
Wir arbeiten daran: Aufgabe 2
Ergebnis 1: 3 - nach 8004ms   Ergebnis 2: 7 - nach 15006ms
Jetzt ist alles fertig! - nach 15009ms
```

Hier sieht man, dass alle Aufgaben nacheinander ausgeführt werden: Nachdem *Sleep(5s)* fertig ist, beginnt Aufgabe 1 mit dem Aufruf von *f1.get()*. Nachdem Aufgabe 1 fertig ist, beginnt Aufgabe 2 mit dem Aufruf von *f2.get()*.

Ohne die Angabe einer launch policy kann der Compiler wählen, ob er wie mit *launch::async* oder wie mit *launch::deferred* vorgeht. In Visual C++ geht er wie mit *launch::async* vor. Bei anderen Compilern kann das anders sein.

Wenn in einer mit *thread* bzw. *async* gestarteten Funktion eine Exception ausgelöst wird, führt das zum Verlassen der Funktion und damit zum Ende des *thread* bzw. von *async*.

Beispiel: Beim Aufruf von *arbeite* mit dem Argument 0 wird eine Exception ausgelöst. Ruft man im Beispiel oben *arbeite* mit dem Argument 0 auf

```
void async_zwischendurch_was_anderes_tun()
{
    Stoppuhr t; // siehe Abschnitt 16.3
    auto f1 = std::async(std::launch::async, arbeite,
                        "Aufgabe 1", 0);
    auto f2 = std::async(std::launch::async, arbeite,
                        "Aufgabe 2", 0);
    ...
}
```

erhält man eine Meldung wie

```
Exception e: Aufgabe 2, n==0 in 'arbeite'
```

Hier sieht man, dass die Aufgabe 2 zuerst ausgeführt wird.

Dass eine mit *thread* bzw. *async* gestartete Funktion bei einer Exception beendet wird, kann man auch dazu nutzen, einen *thread* bzw. *async* nach einem Timeout **abzubrechen**. Dazu kann man eine globale Variable eines atomaren Typs (siehe Abschnitt 17.2.1) verwenden, die vor dem Start der abzubrechenden Funktion auf *false* gesetzt wird:

```
std::atomic_bool interrupt_Fibo = false;
```

Diese setzt man dann nach dem asynchronen Start der Funktion (hier *fibo\_interruptable*) nach dem timeout auf *true*:

```
void fibo_start_with_timeout(int n, std::chrono::milliseconds
                                timeout)
{
    auto f = std::async(std::launch::async, fibo_interruptable, n);
    Sleep(timeout)
    interrupt_Fibo = true;
    try {
        long long r = f.get();
    }
    catch (std::exception& ex)
    {
        cout << ex.what() << endl;
    }
}
```

Falls die atomare Variable den Wert *true* bekommt, löst man in der Funktion eine Exception aus:

```
long long fibo_interruptable(int n)
{ // Fibonacci-Zahlen rekursiv berechnen
    if (interrupt_Fibo)
        throw std::runtime_error("Fibo abgebrochen");
    if (n <= 0) return 0;
    else if (n == 1) return 1;
    else return fibo_interruptable(n - 1) + fibo_interruptable(n -
2);
}
```

Futures kann man auch in einem Array oder einem Container ablegen und den Elementen dann in einer Schleife die Rückgabewerte von *async* zuweisen. In der Funktion *SummiereGeomReiheParallel\_async* werden die Berechnungen, die in *SummiereGeomReiheParallel* (siehe Abschnitt 17.1.3) mit *thread* durchgeführt werden, mit *async* durchgeführt:

```
double SummiereGeomReiheParallel_async(int n, int nThreads)
{ // result = a*q^von + a*q^(von+1) + ... + a*q^(bis-1)
    double a = 0.8, q = 0.8, result = 0;
    if (nThreads == 0)
        return SummeGeomReihe(0, n, a, q);
    else if (nThreads >= 1)
```

```

{
    std::vector<double> r(nThreads);
    std::vector<std::future<double>> t(nThreads);
    int nnT = n / nThreads;
    for (int i = 0; i < nThreads; i++)
    {
        t[i] = std::async(std::launch::async, SummeGeomReihe, i*nnT,
                        (i + 1)*nnT, a, q);
    }
    for (int i = 0; i < nThreads; i++)
    {
        try {
            result += t[i].get();
        }
        catch (std::exception& ex)
        {
            cout << ex.what() << endl;
        }
    }
}
return result;
}

```

Bei einer kleineren Anzahl von Threads sind die Laufzeiten mit *async* und *thread* im Wesentlichen gleich. Bei einer großen Anzahl ist *async* in Visual C++ aber schneller, da *async* bereits beendete Threads wiederverwendet (siehe dazu das Beispiel in Abschnitt 17.1.8). Die nächste Tabelle enthält die Laufzeiten für die beiden Varianten von *SummiereGeomReiheParallel*:

| Benchmarks Visual Studio 2019.4 x64 Release, Laufzeit in Millisekunden |            |            |            |            |            |             |              |       |        |
|------------------------------------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|--------------|-------|--------|
|                                                                        | <i>N=0</i> | <i>N=1</i> | <i>N=2</i> | <i>N=3</i> | <i>N=4</i> | <i>N=10</i> | <i>N=100</i> | 1000  | 10.000 |
| <i>thread</i>                                                          | 7 ms       | 7 ms       | 3,5 ms     | 2,4 ms     | 2,0 ms     | 2,5 ms      | 6,7 ms       | 56 ms | 560 ms |
| <i>async</i>                                                           | 7 ms       | 7 ms       | 3,5 ms     | 2,4 ms     | 1,8 ms     | 2,1 ms      | 2,3 ms       | 3 ms  | 35 ms  |

Der Start einer Funktion mit *async* führt ohne einen Aufruf von *get* oder *wait* dazu, dass beim Verlassen eines Blocks auf den Destruktor des future gewartet wird. Dieser wird erst dann aufgerufen, wenn die mit *async* gestartete Funktion beendet ist.

Obwohl man eventuell auf den ersten Blick erwartet, dass eine Funktion, die in einem Block (z.B. in einer Funktion) mit *async* gestartet wird, nach dem Verlassen des Blocks weiterhin ausgeführt wird, ist das nicht so. Der Destruktor des *future* blockiert, bis die mit *async* gestartete Funktion beendet ist.

Beispiel: Durch die Anweisungen

```

Stoppuhr t; // siehe Abschnitt 16.3
{
    std::future<int> f1 =std::async(arbeite, "Aufgabe 1", 3);
    std::future<int> f2 =std::async(arbeite, "Aufgabe 2", 5);

```

```

cout << "Ohne get - vor dem Verlassen des Blocks" <<
        t.nach() << endl;
// Vergisst man den Aufruf von get, wird auf den
        Destruktor der futures gewartet
} // Aufruf der Destruktoren von f1 und f2 nach dem Ende
        der Blocks
cout << "Nach dem Aufruf der Destruktoren" << t.nach() <<
        endl;

```

erhält man eine Ausgabe wie

```

Ohne get - vor dem Verlassen des Blocks - nach: 1ms
Wir arbeiten daran: Aufgabe 2
Wir arbeiten daran: Aufgabe 1
Nach dem Aufruf der Destruktoren - nach: 5002ms

```

Falls man meint, dass man mit *async* eine Funktion, die endlos lang arbeitet, im Hintergrund starten kann, und danach außerhalb des Blocks weitermachen kann, ist das ein Irrtum. Beim Aufruf einer Funktion wie *starte\_im\_Hintergrund*, die eine Funktion *arbeite\_endlos\_lang* (die nie verlassen wird) startet, hängt das Programm beim Verlassen von *starte\_im\_Hintergrund*:

```

void starte_im_Hintergrund()
{
    future<int> f = std::async(std::launch::async,
                            arbeite_endlos_lang);
    //... weitere Anweisungen, die nicht f.get() oder
                            f.wait() aufrufen
}

```

Obwohl die Funktion *starte\_im\_Hintergrund* auf den ersten Blick so aussieht, als ob sie sofort nach der Ausführung der letzten Anweisung verlassen wird, ist das nicht richtig: Beim Verlassen von *starte\_im\_Hintergrund* wird der Destruktor von *f* aufgerufen wird. Dieser Destruktor-Aufruf dauert aber so lang, bis *arbeite\_endlos\_lang* fertig ist.

Das asynchrone Verhalten von *async* ist also auf den Block beschränkt, in dem *async* gestartet wird. Das ist ein wesentlicher Unterschied zu *async* und *await* von C#, wo man auch außerhalb eines Blocks mit *await* auf die Fertigstellung einer mit *async* gestarteten Task warten kann.

Zum Schluss eine **Gegenüberstellung** von *thread* und *async*:

- Der Start von Funktionen ist mit *async* oft etwas **einfacher** als mit *thread*, da eine mit *async* gestartete Funktion eine **Exception** auslösen darf. Bei *thread* muss sie manuell abgefangen und mit einem *promise* aus dem Thread herausgegeben werden. Stattdessen wird sie bei *async* automatisch im Rückgabewert des Typs *future* abgelegt.
- Bei *async* ist im Unterschied zu *thread* **kein** Aufruf einer Funktion wie *join* notwendig. Deshalb besteht auch keine Gefahr, dass ein vergessenes *join* einen Programmabbruch

zur Folge hat. Ein vergessenes *get* bewirkt lediglich, dass *async* wartet, bis die Funktion fertig ist.

- Will man einen Thread bei einem Timeout abbrechen, ist das mit *async* einfacher als mit *thread*.
- *async* kann einen Threadpool verwenden und damit Zeit für das Erzeugen von Threads sparen. Siehe dazu Abschnitt 17.1.8.
- Obwohl *async* oft **einfacher** ist als ***thread***, kann man *thread* nicht immer durch *async* ersetzen. Wie in Abschnitt 17.2.2 gezeigt wird, darf ein bereits gesperrtes *mutex*-Objekt nicht erneut durch denselben Thread gesperrt werden. Da Threads von *async* wiederverwendet werden, ist das bei der Verwendung von Mutexen in einer von *async* gestarteten Funktion möglich. Das kann einen Programmabbruch zur Folge haben.

### Aufgabe 17.1.7

1. Beschreiben Sie die Ausgabe unter a), b) und c):

```
Stoppuhr t; // siehe Abschnitt 16.3
// Zur Vereinfachung ohne try-catch
```

- a) {
- ```
    std::future<int> f1 = std::async(std::launch::async,
        [] {return arbeite("Aufgabe 1", 3); });
    std::future<int> f2 = std::async(std::launch::async,
        [] {return arbeite("Aufgabe 2", 5); });
    int r1 = f1.get();
    std::string n1 = " f1: " + t.nach();
    int r2 = f2.get();
    std::string n2 = " f2: " + t.nach();
    std::cout << "Nach a): f1+f2=" << r1 + r2 << n1 << n2 << endl;
}
```
- b) t.reset();
- ```
{
    std::future<int> f = std::async(std::launch::async,
        [] {return arbeite("Aufgabe 1", 3) + arbeite("Aufgabe 2", 5);
        });

    int r1 = f.get();
    std::string n1 = " f1: " + t.nach();
    std::cout << "Nach b): f1+f2=" << r1 << n1 << endl;
}
```
- c) t.reset();
- ```
{
    std::future<int> f = std::async(std::launch::async,
        [] {
            future<int> f1 = async(launch::async, [] {return
                arbeite("Aufgabe 2", 3); });
            future<int> f2 = async(launch::async, [] {return
                arbeite("Aufgabe 2", 5); });
            return f1.get()+f2.get(); });
}
```

```

int r1 = f.get();
std::cout << "Nach c): f1+f2=" << r1 << t.nach() << endl;
}

```

2. Die von *async* zurückgegeben futures sollen in einem *vector* gespeichert werden. Werden die folgenden Anweisungen kompiliert? Falls nicht, geben Sie an, was geändert werden muss.

```

void store_futures()
{
    std::vector<std::future<void>> futures;
    for (int i = 0; i < 20; ++i)
    {
        auto fut = std::async([]
        {
            std::this_thread::sleep_for(std::chrono::seconds(1));
            std::cout << std::this_thread::get_id() << " ";
        });
        futures.push_back(fut);
    }
    for (auto f : futures)
    {
        f.get();
    }
}

```

### 17.1.8 Informationen über Threads

Die Elementfunktion

*static unsigned hardware\_concurrency() noexcept;*

gibt die maximale Anzahl der Threads zurück, die auf dem aktuellen System parallel ausgeführt werden können, bzw. den Wert 0, wenn diese Anzahl nicht verfügbar ist. Das ist normalerweise die Anzahl der verfügbaren Hardware-Threads (CPUs, Prozessorkerne, Hyperthreading-Kerne usw.) auf dem Rechner, der virtuelle Maschine usw.

Beispiel: Da das eine *static* Funktion ist, kann man sie sowohl über den Namen der Klasse als auch über ein Objekt aufrufen:

```

int n = thread::hardware_concurrency();
cout << "thread::hardware_concurrency=" << n << endl; //
thread t([] {});
int s = t.hardware_concurrency();
cout << "t.hardware_concurrency=" << s << endl;
t.join();

```

Hier wird auf meinem Rechner mit einem 4-Kern Prozessor der Wert 4 ausgegeben, wenn man das Programm direkt vom Betriebssystem startet. Startet man

es von einer virtuellen VMWare-Maschine, der ein Prozessorkern zugeteilt wurde, wird dagegen 1 ausgegeben.

Mit

```
bool joinable() const noexcept;
```

kann man feststellen, ob einem *thread*-Objekt eine Folge von ausführbaren Anweisungen zugewiesen wurde, und für dieses noch nicht *join* aufgerufen wurde. Bei einem solchen Thread kann man dann mit *join* warten, bis er fertig ist. Der Aufruf von *join* für einen Thread, der nicht *joinable* ist, kann eine Exception auslösen.

Beispiel: Ein mit dem Standardkonstruktor erzeugtes *thread*-Objekt stellt ohne weitere Operationen (wie z.B. eine Zuweisung an das *thread*-Objekt) keinen Ausführungs-Thread dar. Deswegen gibt *joinable* den Wert *false* zurück.

```
thread t0;
bool b0 = t0.joinable(); // false
thread t1(f); // f eine Funktion
bool b1 = t1.joinable(); // true
t1.join();
bool b2 = t1.joinable(); // false
```

Nach der Zuweisung

```
t0 = thread(f); // f eine Funktion
```

gibt *joinable* den Wert *true* zurück.

Wird ein Programm beendet, ohne dass *join()* für alle Threads aufgerufen wird, hat das einen Programmabbruch zur Folge.

Ein Aufruf von

```
void detach();
```

bewirkt, dass der zugehörige Thread unabhängig von dem Thread ausgeführt wird, der ihn gestartet hat. Danach wird der Thread durch kein Objekt des Typs *thread* mehr dargestellt, so dass auch keine Möglichkeit mehr besteht, auf den Thread zu warten. Er wird spätestens mit dem Ende des Programms beendet, von dem er gestartet wurde. Normalerweise besteht keine Veranlassung, *detach* aufzurufen.

Beispiel: Nach dem Start von

```
thread t(f); // f: eine Funktion
bool b0 = t.joinable(); // true
```

gibt *joinable* den Wert *true* zurück. Nach dem Aufruf von *detach* ist *joinable* *false*.

```
t.detach();
bool b1 = t.joinable(); // false
```

Informationen zur Identifikation eines Threads erhält man mit

```
id get_id() const noexcept;
native_handle_type native_handle()
```

Hier ist *id* eine innerhalb der Klasse *thread* definierte Klasse, die einen eindeutigen Bezeichner für den Thread zurückgibt. Für diese Klasse sind die Operatoren

```
bool operator==(thread::id x, thread::id y); // analog !=, <, <=, >, >=
```

definiert, sowie der Ausgabeoperator <<. Mit *native\_handle* erhält man das thread-handle des Betriebssystems. Über dieses handle kann man dann auch API-Operationen für diesen Thread aufrufen.

Beispiel: Mit

```
thread t1(f);
thread t2(f);
cout << "id1=" << t1.get_id() << " id2=" << t2.get_id()
    << " n1=" << t1.native_handle()
    << " n2=" << t2.native_handle() << endl;
```

erhält man eine Ausgabe wie

```
id1=22316 id2=16028 n1=00000060 n2=00000064
```

Entsprechende Informationen über den **aktuellen Thread** erhält man mit der Funktion *get\_id* aus dem verschachtelten Namensbereich *std::this\_thread*:

```
namespace this_thread{
    thread::id get_id() noexcept;
    ...
}
```

Beispiel: Ergänzt man das letzte Beispiel noch um die Anweisung

```
cout << "parent thread: " << std::this_thread::get_id() <<
    endl;
```

erhält man eine Ausgabe wie

```
parent thread: 00398F28
```

Mit *get\_id* kann man sich davon überzeugen, dass *async* beendete Threads wiederverwendet. Dazu legt man die von *get\_id* zurückgegebenen Werte in ein

```
set<std::thread::id>
```

ab. Da *set* keine Duplikate aufnimmt, feststellen, wie viele Threads erzeugt werden.

Beispiel: Startet man die Funktion



```
void store_id(std::set<std::thread::id>& count_ids)
{
    count_ids.insert(std::this_thread::get_id());
}
```

von vielen Threads, werden die IDs dieser threads in einem *set* abgelegt:

```
void thread_id_count()
{
    std::set<std::thread::id> async_ids;
    std::set<std::thread::id> thread_ids;

    const int nt = 1000;
    std::future<void> a[nt];
    for (int i = 0; i < nt; i++)
        a[i] = std::async(std::launch::async, store_id,
                          std::ref(async_ids));

    for (int i = 0; i < nt; i++)
        a[i].get();

    thread t[nt];
    for (int i = 0; i < nt; i++)
        t[i] = thread(store_id, std::ref(thread_ids));
    for (int i = 0; i < nt; i++)
        t[i].join();

    cout << "n_as=" << async_ids.size() << " n_th" <<
          thread_ids.size() << endl;
}
```

Das Ergebnis zeigt dann an, dass mit *async* nur z.B. 5 Threads erzeugt wurden, während mit *thread* 1000 Threads erzeugt werden.

### 17.1.9 Sleep-Funktionen

Mit den sleep-Funktionen aus dem Namensbereich *std::this\_thread* kann man erreichen, dass der aktuelle Thread für eine bestimmte Zeit nicht bei der Zuteilung von CPU-Zeit berücksichtigt werden soll

```
namespace this_thread {
    void yield() noexcept;
    template <class Clock, class Duration>
        void sleep_until(const chrono::time_point<Clock, Duration>& abs_time);
    template <class Rep, class Period>
        void sleep_for(const chrono::duration<Rep, Period>& rel_time);
}
```

Dabei können der Zeitpunkt bzw. die Zeitdauer mit Elementen der *chrono*-Klassen angegeben werden. Die Signatur dieser Funktionen mag auf den ersten Blick etwas abschreckend aussehen:

```
template <class Clock, class Duration>
void sleep_until(const chrono::time_point<Clock, Duration>& abs_time);

template <class Rep, class Period>
void sleep_for(const chrono::duration<Rep, Period>& rel_time);
```

Wenn man aber weiß, wie das geht, ist ihre Verwendung einfach.

Beispiel: Die aktuelle Zeit (als Zeitpunkt) erhält man mit *now*. Einen Zeitpunkt 500 Millisekunden später als jetzt mit

```
auto in500ms = std::chrono::steady_clock::now() +
               std::chrono::milliseconds(500);
```

Bis dahin kann man dann warten mit

```
std::this_thread::sleep_until(in500ms);
```

Misst man die Laufzeit der Funktion

```
void Sleep(const std::chrono::steady_clock::duration& d)
{
    std::this_thread::sleep_for(d);
}
```

mit dem Benchmarktimer von Abschnitt 13.4,

```
using namespace std::chrono_literals;
BenchmarkTimer t1("Sleep(1ms) ", [] {Sleep(1ms); });
BenchmarkTimer t2("Sleep(10ms) ", [] {Sleep(10ms); });
BenchmarkTimer t3("Sleep(100ms) ", [] {Sleep(100ms); });
BenchmarkTimer t4("Sleep(1000ms) ", [] {Sleep(1000ms); });
```

sieht man, dass die Ergebnisse mit Argumenten des Typs *milliseconds* und *seconds* gut zusammenpassen:

```
Sleep(1ms)      Elapsed time: 0.001000 secs
Sleep(10ms)     Elapsed time: 0.010001 secs
Sleep(100ms)    Elapsed time: 0.100006 secs
Sleep(1000ms)   Elapsed time: 1.000057 secs
```

Mit Argumenten des Typs *nanoseconds* und *microseconds* haben die Ergebnisse stark geschwankt und waren ungenau:

```
BenchmarkTimer t3("Sleep(1000ns) ", [] {Sleep(1000ns); });
```

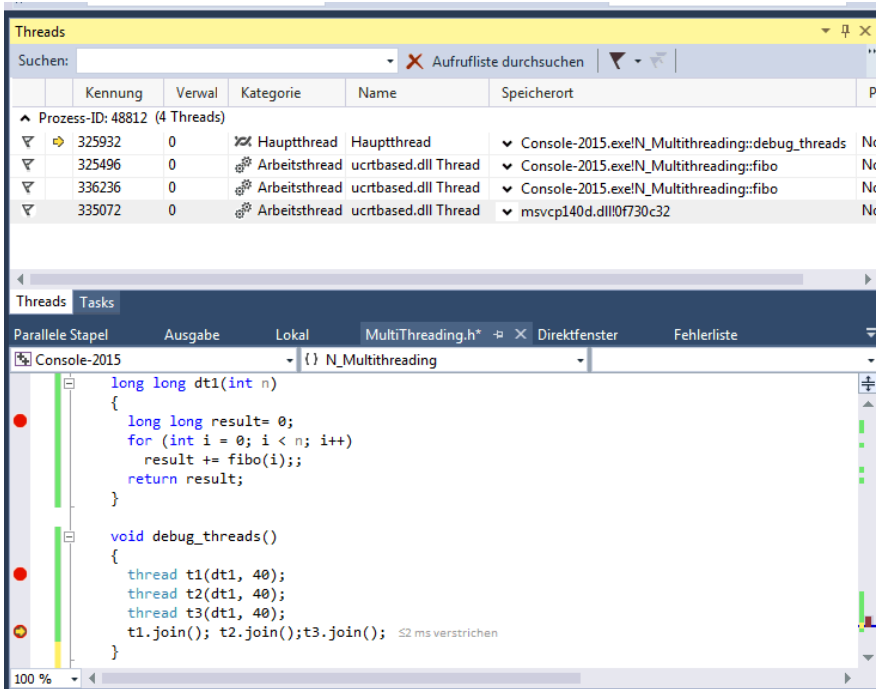
Ein Aufruf von

```
void yield() noexcept;
```

bewirkt, dass der aktuelle Thread auf den restlichen Teil der aktuellen Zeitscheibe verzichtet. Bei der nächsten Zuteilung einer Zeitscheibe wird er aber wieder berücksichtigt.

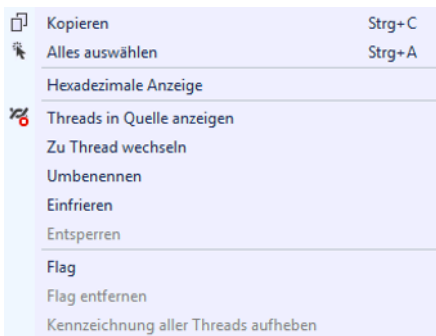
### 17.1.10 Threads im Debugger

Startet man verschiedene Threads im Debugger und hält man an einem Haltepunkt an, werden die aktuell laufenden Threads mit *Debuggen*|*Fenster*|*Tasks*|*Threads* angezeigt:



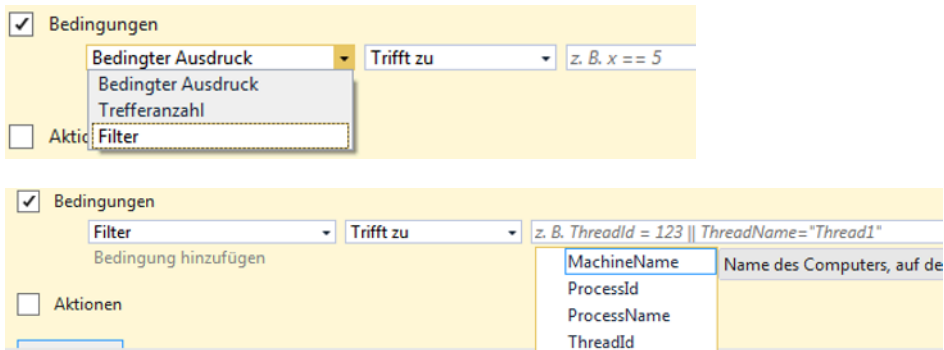
Im Thread-Fenster zeigt der gelbe Pfeil dann auf den aktuell ausgeführten Thread.

Im Kontextmenü zu einem Thread



kann man dann zu diesem Thread wechseln und dann z.B. die Werte der lokalen Variablen in diesem Thread anzeigen. Mit *Einfrieren* erreicht man, dass der Thread nicht mehr ausgeführt wird.

Mit einem bedingten Breakpoint, bei dem als Bedingung ein Filter mit der ThreadId gesetzt wird



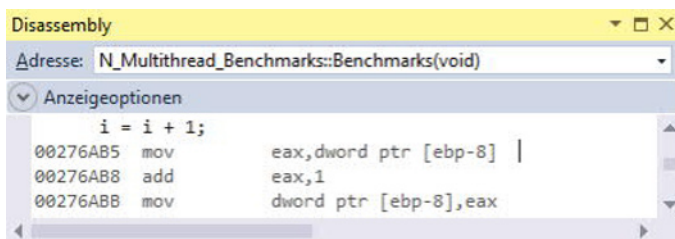
kann man erreichen, dass das Programm nur für einen bestimmten Thread am Breakpoint anhält:



## 17.2 Kritische Abschnitte

Den verschiedenen Threads eines Programms wird die CPU vom Betriebssystem zugeteilt und wieder entzogen. Da eine C++-Anweisung vom Compiler in mehrere Maschinenanweisungen übersetzt werden kann, kann es vorkommen, dass einem Thread die CPU während der Ausführung einer C++-Anweisung entzogen wird, obwohl diese erst zum Teil abgearbeitet ist.

Beispiel: Während der Ausführung eines Programms im Debugger (*Debuggen|Debuggen starten*) werden nach dem Anhalten an einem Haltepunkt im Fenster *Debuggen|Fenster|Disassembly* die Maschinenanweisungen angezeigt, die der Compiler aus den C++-Anweisungen erzeugt hat:



Hier sieht man, dass die C++-Anweisung

```
i = i + 1;
```

zu drei Maschinenanweisungen führt:

1. Kopiere den Wert von  $i$  aus dem Hauptspeicher in das Prozessorregister *eax*
2. Addiere 1 zum Wert in *eax*
3. Kopiere den Wert von *eax* an die Adresse von  $i$

Wenn  $i = 0$  ist und die Anweisung  $i = i + 1$  von zwei Threads ausgeführt wird, wobei der eine Thread nicht vom anderen unterbrochen zu werden, hat  $i$  anschließend den Wert 2. Wird der erste Thread nach der Anweisung 1. dagegen vom zweiten Thread unterbrochen, hat  $i$  nach den beiden Threads den Wert 1.

Wenn mehrere Threads auf gemeinsame Daten zugreifen, kann das also zu völlig unerwarteten und falschen Ergebnissen führen. Deswegen bezeichnet man einen Speicherbereich (z.B. eine Variable), auf den mehrere Threads zugreifen können, als **kritischen Abschnitt** (critical section). Da das Ergebnis der Operationen in einem kritischen Abschnitt davon abhängt, welche Operationen zuerst ausgeführt werden, spricht man auch von einem **data race** oder von einem **kritischen Wettlauf**.

Da man nicht weiß, ob und wann ein Thread einen anderen unterbricht, sind die Ergebnisse eines kritischen Wettlaufs nicht vorhersagbar. Insbesondere können die Ergebnisse von zwei verschiedenen Ausführungen derselben Anweisungen verschieden sein. Oft treten solche Effekte nur selten auf. Startet man das Programm im Debugger, ist der Fehler oft nicht reproduzierbar und kann nur sehr schwierig gefunden werden.

Beispiel: Die Werte des globalen Arrays

```
const int nArrayElemente = 100000;
int a[nArrayElemente];
```

werden bei jedem Aufruf von

```
void Add_ohne_Sync()
{
    for (int j = 0; j < nArrayElemente; j++)
        a[j] = a[j] + 1;
}
```

um 1 erhöht. Startet man diese Funktion von  $nThreads$  verschiedenen Threads aus, indem man sie

```
int IncrementArrayByThreads(std::function<void(void)> f,
                           int nThreads)
{
    AlleArrayelementeAufNullsetzen();
    // for (int i = 0; i < nArrayElemente; i++) a[i] = 0;
    std::vector<std::thread> t(nThreads);
    for (int i = 0; i < nThreads; i++)
        t[i] = std::thread([f] {f(); });
}
```

```

    for (int i = 0; i < nThreads; i++)
        t[i].join();
    return Anzahl_Fehler(nThreads); // Anzahl der Werte,
    // die von nThreads verschieden sind
}

```

als Argument für `f` übergibt, erhält man meist nicht `nThreads` als Wert der Arrayelemente, sondern einen anderen Wert. Zählt man die falschen Ergebnisse mit einer Funktion wie

```

int Anzahl_Fehler(int Sollwert)
{
    int Fehler = 0;
    for (int i = 0; i < nArrayElemente; i++)
        if (a[i] != Sollwert)
            Fehler++;
    return Fehler;
}

```

dann kann man beobachten, dass nicht jedes Mal Fehler auftreten. Manchmal treten keine Fehler auf, manchmal nur wenige und manchmal auch viele. Deswegen sind solche Fehler oft auch schwer zu finden.

Zur Vermeidung von Fehlern infolge eines kritischen Wettlaufs gibt es im Prinzip zwei Möglichkeiten:

1. Man verwendet Operationen, die nicht unterbrochen werden können. Solche Operationen werden als **atomar** bezeichnet und in Abschnitt 17.2.1 vorgestellt.
2. Man verhindert, dass ein zweiter Thread die Anweisungen eines kritischen Abschnitts ausführt, wenn schon ein erster Thread diese Anweisungen ausführt. Diese Vorgehensweise wird als gegenseitiger Ausschluss („mutual Exclusion“) bezeichnet und in den Abschnitten ab 17.2.2 vorgestellt. Sie kann dadurch erreicht werden, dass der zweite Thread wartet, bis der erste den kritischen Bereich verlassen hat. Damit der zweite Thread beim Warten keine CPU-Zeit in Anspruch nimmt, wird er in die Warteschlange der wartenden Threads umgehängt.

Die nächste Tabelle enthält ab 2. die Laufzeiten der wichtigsten Synchronisationsmechanismen, die in diesem Kapitel vorgestellt werden. Offensichtlich ist der Aufwand für die Synchronisation meist nicht sehr hoch.

Diese Laufzeiten wurden mit der Funktion *IncrementArrayByThreads* aus dem letzten Beispiel gemessen. Dieser Funktion wurden anstelle von *Addiere\_ohne\_Sync* Funktionen übergeben, die als Thread gestartet werden und die die Werte im Array hochzählen.

| Benchmarks Visual Studio 2019.5, Release, x64, <i>nElements</i> =10000, alle Zeiten in Millisekunden | <i>nThreads</i><br>100 | <i>nThreads</i><br>1000 | <i>nThreads</i><br>10000 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 1. <i>Add ohne Sync</i> (siehe oben)                                                                 | 7 ms                   | 75 ms                   | 680 ms                   |
| 2. <i>Add Atomic</i> (siehe Abschnitt 17.2.1)                                                        | 7 ms                   | 75 ms                   | 800 ms                   |
| 3. <i>lock mtx vor for</i> (siehe 17.2.2)                                                            | 7 ms                   | 63 ms                   | 730 ms                   |
| 4. <i>scoped lock vor for</i> (siehe 17.2.2)                                                         | 7 ms                   | 66 ms                   | 750 ms                   |
| 5. <i>scoped lock mit recursive mutex</i> (17.2.2)                                                   | 6 ms                   | 75 ms                   | 820 ms                   |

### 17.2.1 Atomare Datentypen

Atomare Datentypen sind Datentypen, für die gewisse Operationen unteilbar sind. Variablen dieser Datentypen sind dann für solche Operationen keine kritischen Bereiche. Atomare Datentypen stehen in C++11 nach

```
#include <atomic>
```

zur Verfügung. Die Bezeichnung „atomar“ bezieht sich lediglich auf die Unteilbarkeit der Operationen. Der C++-Standard weist darauf mit einem Späßchen hin:

“Atomic objects are neither active nor radioactive.”

Beispiel: Für den atomaren Datentyp `std::atomic_int` (der `int`-Werte darstellt), ist die Operation `+=` unteilbar. Deswegen erhält man mit den atomaren Variablen

```
std::atomic_int a_atomic[nArrayElemente];
```

durch Operationen wie in

```
void Add_Atomic()
{
    for (int j = 0; j < nArrayElemente; j++)
    {
        a_atomic[j] += 1;
    }
}
```

bei dem Aufruf

```
Fehler_atomar = IncrementArrayByThreads(Addiere_Atomic,
                                         nTasks);
```

immer das richtige Ergebnis.

Allerdings sind nicht alle Operationen mit atomaren Datentypen unteilbar. So ist z.B. im Gegensatz zu `+=` die Operation `+` nicht unteilbar. Visual Studio gibt in einem solchen Fall keine Warnung aus.

Beispiel: Ersetzt man im letzten Beispiel in der Zeile

```
a_atomic[j] += 1;
```

die Operation += durch +

```
a_atomic[j] = a_atomic[j] + 1;
```

erhält man falsche Ergebnisse.

Im Header <atomic> stehen die folgenden atomaren Ganzzahldatentypen zur Verfügung, die den elementaren Ganzzahldatentypen in der Spalte rechts davon entsprechen:

| Datentyp             | Ganzzahl Datentyp     | Datentyp               | Ganzzahl Datentyp         |
|----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|
| <i>atomic_char</i>   | <i>char</i>           | <i>atomic_long</i>     | <i>long</i>               |
| <i>atomic_schar</i>  | <i>signed char</i>    | <i>atomic_ulong</i>    | <i>unsigned long</i>      |
| <i>atomic_uchar</i>  | <i>unsigned char</i>  | <i>atomic_llong</i>    | <i>long long</i>          |
| <i>atomic_short</i>  | <i>short</i>          | <i>atomic_ullong</i>   | <i>unsigned long long</i> |
| <i>atomic_ushort</i> | <i>unsigned short</i> | <i>atomic_char16_t</i> | <i>char16_t</i>           |
| <i>atomic_int</i>    | <i>int</i>            | <i>atomic_char32_t</i> | <i>char32_t</i>           |
| <i>atomic_uint</i>   | <i>unsigned int</i>   | <i>atomic_wchar_t</i>  | <i>wchar_t</i>            |

Für jeden dieser atomaren Datentypen sind die folgenden Operationen und Funktionen atomar:

| Operation          |                         |
|--------------------|-------------------------|
| =                  | Zuweisung               |
| ++, --             | Präfix und Postfix      |
| +=, -=, &=,  =, ^= | kombinierte Zuweisungen |

Die atomaren Datentypen *atomic\_int* usw. (aus der Tabelle oben) sind aber nicht die einzigen atomaren Datentypen. Sie sind partielle Spezialisierungen eines Klassen-Templates *atomic*, wie z.B.

```
using atomic_int = atomic<int>;
```

Dieses Klassen-Template kann mit Typ-Argumenten, die gewisse Anforderungen erfüllen (z.B. keine virtuellen Funktionen, trivialer Kopierkonstruktor und Zuweisungsoperator), spezialisiert werden. Für andere Typ-Argumente als die elementaren Ganzzahldatentypen stehen die Operationen aus der letzten Tabelle allerdings nicht zur Verfügung. Die im Wesentlichen einzigen Funktionen einer solchen Klasse sind *load*, *store*, *exchange*, die eine Variable laden, speichern oder vertauschen. Da diese Operationen aber für größere Typ-Argumente nicht in einer einzigen Maschinenanweisung ausgeführt werden können, werden intern Locks (siehe Abschnitt 17.2.2) verwendet. Für solche Typ-Argumente ist die Bezeichnung „atomar“ eigentlich irreführend, und sie bringt auch keinen Geschwindigkeitsvorteil gegenüber Locks.

Atomare Ganzzahldatentypen mit ihren unteilbaren Operationen bieten also eine einfache Möglichkeit, die mit kritischen Abschnitten verbundenen Probleme zu vermeiden. Allerdings sind atomare Datentypen nicht für alle Anwendungsfälle ausreichend. In der Praxis



verwendet man deshalb oft Mechanismen, die verhindern, dass andere Threads Anweisungen aus einem kritischen Abschnitt ausführen (gegenseitiger Ausschluss, mutual exclusion), die in den nächsten Abschnitten vorgestellt werden.

### 17.2.2 Kritische Bereiche mit *mutex* und *lock\_guard* bzw. *scoped\_lock* sperren

Kritische Bereiche kann man mit Objekten der nach

```
#include <mutex>
```

im Namensbereich *std* verfügbaren Klassen sperren. In diesem Abschnitt wird zunächst nur die grundlegende Vorgehensweise an Beispielen mit den Klassen *mutex*, *lock\_guard* und *scoped\_lock* gezeigt. Diese Vorgehensweise ist für viele Anwendungen ausreichend. Spezialfälle und Hintergründe werden dann in Abschnitt 17.2.3 beschrieben.

Die Klasse

```
class mutex {
public:
    constexpr mutex() noexcept;
    ~mutex();
    mutex(const mutex&) = delete;
    mutex& operator=(const mutex&) = delete;
    void lock();
    bool try_lock();
    void unlock();
};
```

besteht im Wesentlichen nur aus einem Standardkonstruktor und den beiden Funktionen *lock* und *unlock*, die auf atomaren Datentypen basieren. Da *mutex* keinen Kopierkonstruktor hat, kann ein *mutex* nicht als Wertparameter, sondern nur als Referenzparameter übergeben werden.

Mit einem Aufruf von *lock* kann ein Thread ein *mutex*-Objekt sperren. Falls das *mutex*-Objekt

- nicht bereits gesperrt ist, wird es durch *lock* gesperrt. Anschließend werden die auf *lock* folgenden Anweisungen ausgeführt.
- bereits durch einen anderen Thread gesperrt ist, wird der Thread durch *lock* so lange blockiert (d.h. in die Warteschlange der wartenden Threads umgehängt), bis das *mutex*-Objekt vom anderen Thread mit *unlock* wieder freigegeben wird. Nach der Freigabe wird der Thread von der Warteschlange der wartenden Threads in die der bereiten Threads zurückgehängt.
- bereits durch denselben Thread gesperrt ist, ist das Verhalten des Programms undefiniert. Wenn eine solche Verwendung erkannt wird, soll eine Exception ausgelöst werden. Das ist aber nicht immer möglich. Auf jeden Fall soll ein Thread ein bereits von ihm gesperrtes *mutex*-Objekt nicht erneut sperren.

Nach dem Aufruf von *lock* wird ein weiterer Aufruf von *lock* **von einem anderen Thread** aus so lange gesperrt, bis der erste den Mutex mit *unlock* wieder frei gibt. Dieses *lock* bewirkt, dass der Thread vom Betriebssystem aus in den Zustand „blockiert“ gesetzt wird, in dem er

bei der Vergabe der Zeitscheibe nicht berücksichtigt wird. Die entscheidende Voraussetzung ist hier, dass der Aufruf von *lock* von einem anderen Thread erfolgt. Falls derselbe Thread mit demselben Mutex *lock* aufruft, wird eine Exception ausgelöst.

Da ein anderer Thread so lange auf einen gesperrten *lock* warten muss, bis dieser wieder freigegeben wird, sollten die Anweisungen im gesperrten Bereich möglichst kurz sein.

Beispiel: Übergibt man der Funktion *IncrementArrayByThreads* von Abschnitt 17.2 die Funktion

```
std::mutex mtx_global;

void lock_mtx_vor_for()
{ // besser scoped_lock oder lock_guard verwenden
  mtx_global.lock();
  for (int j = 0; j < nArrayElemente; j++)
    a[j] = a[j] + 1;
  mtx_global.unlock();
}
```

als Argument für *f*, erhalten alle Array-Elemente den gewünschten Wert.

Wenn ein Thread einen Mutex gesperrt hat, sagt man auch, dass der Thread den Mutex besitzt. Der Thread besitzt den Mutex dann bis zur Freigabe mit ***unlock***. Unterbleibt der Aufruf von *unlock*, bleibt der Mutex bis zum Ende des Programms gesperrt. Beim nächsten Aufruf von *lock* wartet das Programm dann wie bei einer Endlosschleife auf ein *unlock*, das nie stattfindet.

Ein Aufruf von *unlock* kann auch dadurch unterbleiben, dass zwischen *lock* und *unlock* eine Funktion aufgerufen wird, die eine Exception auslöst.

Beispiel: Wenn der Aufruf von *f* in

```
void mutex_wird_nicht_freigegeben(int n)
{
  mutex.lock();
  f(n);
  mutex.unlock();
}
```

eine Exception auslöst, wird das Programm nach dieser Exception im zugehörigen Exception-Handler fortgeführt, ohne das *unlock* ausgeführt wird.

Den Aufruf von *unlock* kann man dadurch sicherstellen, dass man den *mutex* in eine Klasse aufnimmt und im Destruktor der Klasse wieder frei gibt. Der Destruktor wird immer beim Verlassen eines Blocks aufgerufen (RAII, siehe Abschnitt 10.6), auch wenn der Block aufgrund einer Exception verlassen wird. Genau das wird von den Klassen ***lock\_guard*** und ***scoped\_lock*** (seit C++17) gemacht. Deswegen sollte man immer ein *lock\_guard*- oder *scoped\_lock*-Objekt verwenden und nie ein *mutex*-Objekt manuell mit *lock* sperren und mit *unlock* freigeben.

Die Klasse *lock\_guard* besteht im Wesentlichen nur aus zwei Konstruktoren, denen ein *mutex* übergeben wird, und einem Destruktor: Der Konstruktor sperrt den übergebenen Mutex, und der Destruktor gibt ihn wieder frei. Der zweite Konstruktor mit *adopt\_lock\_t* ist nur in Spezialfällen von Bedeutung und wird in Abschnitt 17.3 vorgestellt. Ein *scoped\_lock* ist im Wesentlichen gleich aufgebaut, kann aber mehrere Mutexe sperren, ohne dass dabei ein Deadlock auftreten kann (siehe Abschnitt 17.2.4).

```
template <class _Mutex> // die vollständige Klasse aus <mutex>
class lock_guard { // class with destructor that unlocks a mutex
public:
    using mutex_type = _Mutex;

    explicit lock_guard(_Mutex& _Mtx) : _MyMutex(_Mtx)
    {
        _MyMutex.lock(); // construct and lock
    }

    lock_guard(_Mutex& _Mtx, adopt_lock_t) : _MyMutex(_Mtx)
    { } // construct but don't lock

    ~lock_guard() noexcept
    {
        _MyMutex.unlock();
    }

    lock_guard(const lock_guard&) = delete;
    lock_guard& operator=(const lock_guard&) = delete;
private:
    _Mutex& _MyMutex;
};
```

Die Verwendung von *lock\_guard* ist sehr einfach: Man muss nur in einem Block ein Objekt des Typs *lock\_guard* anlegen, das mit einem globalen Mutex initialisiert wird. Dann können die darauffolgenden Anweisungen des Blocks nicht von einem anderen Thread ausgeführt werden, bevor der Mutex wieder freigegeben wird. Beim Verlassen des Blocks wird er dann automatisch wieder freigegeben.

Da bei einem *lock\_guard* und einem *scoped\_lock* der Datentyp des Parameters im Konstruktor der des Typ-Parameters ist, kann der Compiler diesen Datentyp ableiten, was ein wenig Schreibarbeit spart. Während man das Typ-Argument vor C++17 noch angeben musste,

```
lock_guard<mutex> lg mtx_global;
scoped_lock<mutex> sl(mtx_global);
```

kann man es seit C++17 weglassen:

```
lock_guard lg(mtx_global);
scoped_lock sl(mtx_global);
```

Beispiel: Mit einem *scoped\_lock* bzw. *lock\_guard* kann man viele Anweisungen sperren

```

std::mutex mtx_global;

void scoped_lock_vor_for()
{
    std::scoped_lock sl(mtx_global); // vor C++17:
                                   lock_guard<mutex> lock(mtx_global);
    for (int j = 0; j < nArrayElemente; j++)
    {
        a[j] = a[j] + 1;
    }
}

```

oder auch nur wenige:

```

void scoped_lock_in_for()
{
    for (int j = 0; j < nArrayElemente; j++)
    {
        std::scoped_lock sl(mtx_global);
        a[j] = a[j] + 1;
    }
}

```

Wenn der kritische Bereich ein Array ist, kann man auch für jedes Array-Element einen eigenen Mutex verwenden. Dann müssen andere Threads nicht so oft auf ein Mutex warten, das gerade gesperrt ist:

```

std::mutex mtx_arr[nArrayElemente];

void scoped_lock_Array()
{
    for (int j = 0; j < nArrayElemente; j++)
    {
        std::scoped_lock sl(mtx_arr[j]);
        a[j] = a[j] + 1;
    }
}

```

Mit allen drei Varianten erhält man korrekte Ergebnisse. Die Laufzeiten sind aber verschieden, da das Sperren eines Mutex länger dauert als die Addition eines Wertes. Im ersten Fall wird der Mutex in jedem Thread nur einmal gesperrt. Im zweiten und dritten Fall dagegen viel öfter. Die dritte Variante ist aber schneller als die zweite, da ein Thread nur seltener auf die Freigabe des gesperrten Bereichs warten muss.

| Benchmarks Visual Studio 2019.5, Release, x64, $nElements=10000$ , alle Zeiten in Millisekunden | $nThreads$ 100 | $nThreads$ 1000 | $nThreads$ 10000 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------|------------------|
| <i>scoped_lock vor for:</i><br>Anzahl Locks: $nThreads$                                         | 7 ms           | 66 ms           | 750 ms           |
| <i>scoped_lock in for:</i><br>Anzahl Locks: $nElements * nThreads$                              | 35 ms          | 330 ms          | 3500 ms          |
| <i>scoped_lock Array:</i><br>Anzahl Locks: $nElements * nThreads$                               | 17 ms          | 160 ms          | 2200 ms          |

In der nächsten Tabelle wurde die Anweisung „ $a[j] = a[j] + 1$ ;“ durch eine zeitaufwendigere ersetzt. Die Variante mit *scoped\_lock vor for* ist aber immer noch die schnellste:

| Benchmarks Visual Studio 2019.5, Release, x64, $nElements=10000$ , alle Zeiten in Millisekunden | $nThreads$ 100 | $nThreads$ 1000 | $nThreads$ 10000 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------|------------------|
| <i>scoped lock vor for:</i>                                                                     | 10 ms          | 90 ms           | 950 ms           |
| <i>scoped lock in for:</i>                                                                      | 1200 ms        | 12000 ms        | 250000 ms        |
| <i>scoped lock Array:</i>                                                                       | 300 ms         | 4000 ms         | 40000 ms         |

Gibt man von mehreren Threads aus Meldungen mit *std::cout* aus, kann es vorkommen, dass der Text aus einem Thread durch den eines anderen Threads unterbrochen wird. Das kann man verhindern, indem man den Zugriff auf *cout* durch einen Mutex sperrt.

Beispiel: Mit *write* kann man von mehreren Threads aus Meldungen ausgeben, ohne dass diese sich gegenseitig zerstückeln.

```
std::mutex cout_mtx;

void write(std::string s)
{
    std::scoped_lock g(cout_mtx);
    std::cout << s;
}
```

Damit verschiedene Threads durch ein *mutex*-Objekt synchronisiert werden können, müssen alle diese Threads dieses *mutex*-Objekt verwenden. Deswegen wird es meist auf derselben Ebene wie die zu synchronisierenden Daten definiert:

- globale Daten werden durch ein globales *mutex*-Objekt synchronisiert
- Daten in einer Klasse werden durch ein Mutex in der Klasse synchronisiert

Ein lokales *mutex*-Objekt wird vom Compiler nicht bemängelt. Da aber bei jedem Aufruf der Funktion ein anderes Mutex angelegt wird, ist dieses lokale Mutex bei jedem Start der Funktion nicht blockiert und es keinen Synchronisationseffekt.

Beispiel: Ein lokales *mutex*-Objekt hat keinen Synchronisationseffekt:

```

void Addiere_mit_lokalem_Mutex()
{ Fehler bei der Summation, keine Synchronisation
  std::mutex mtx_lokal;
  std::scoped_lock lock(mtx_lokal); // vor C++17:
                                   lock_guard<mutex> lock(mtx_lokal);
  for (int j = 0; j < nArrayElemente; j++)
  {
    a[j] = a[j] + 1;
  }
}

```

Ergänzt man die Definition des lokalen Mutex durch *static*,

```
static std::mutex mtx_lokal;
```

existiert das bei dem ersten Aufruf der Funktion angelegte Mutex auch noch bei jedem weiteren Aufruf, so dass der kritische Bereich auch gesperrt wird.

Falls beim Aufruf von *lock* ein Fehler auftritt, wird eine Exception ausgelöst. Der C++-Standard sieht die folgenden Exceptions vor:

- *resource\_unavailable\_try\_again*: Falls der Lock nicht verfügbar ist.
- *operation\_not\_permitted*: Falls der Thread kein Recht für die Sperre hat.
- *device\_or\_resource\_busy*: Falls der Mutex schon belegt ist.
- *invalid\_argument*: Falls bei der Konstruktion des Mutex ein Fehler auftritt.

Eine maßgebliche Voraussetzung beim Einsatz eines *mutex*-Objekts ist, dass damit von demselben Thread aus nicht erneut *lock* aufgerufen wird, bevor es nicht mit *unlock* wieder frei gegeben wurde. Diese Voraussetzung ist aber bei rekursiven Funktionen oder bei Funktionen, die sich gegenseitig aufrufen, nicht immer gewährleistet. Dann kann man

```
#include <mutex>
```

die Klasse ***recursive\_mutex*** verwenden, die im Wesentlichen dieselben Elementfunktionen hat. Sie unterscheidet sich von einem gewöhnlichen *mutex* vor allem dadurch, dass *lock* auch von einem Thread aufgerufen werden kann, der den Mutex bereits blockiert hat.

Beispiel: Ruft man in einem Thread ein zweites Mal mit demselben Mutex *lock* auf, bevor dieser wieder freigegeben wurde, erhält man die am Schluss als Kommentar angegebene Ausgabe.

```

auto f = std::async(std::launch::async, [] {
  lock_guard lg1(mtx_global);
  lock_guard lg2(mtx_global); // löst eine Exception aus
  ; });
try {
  f.get(); // damit die Exception weitergegeben wird.
}

```

```
catch (const std::exception& e)
{
    cout << "Exc e: " << e.what() << endl;
} // Exc e: device or resource busy: device or resource busy
```

Ersetzt man hier

```
std::mutex mtx_global;
```

durch

```
std::recursive_mutex rec_mtx;
```

wird keine Exception ausgelöst:

```
auto f = std::async(std::launch::async, [] {
    lock_guard<std::recursive_mutex> lg1(rec_mtx);
    lock_guard<std::recursive_mutex> lg2(rec_mtx);
}); // keine Exception
```

Alle Mutex-Klassen haben die Elementfunktion

```
bool try_lock();
```

Mit ihr kann man versuchen, einen Mutex zu sperren. Falls der nicht durch einen anderen Thread blockiert ist, ist der Rückgabewert *true*, und der Mutex wird belegt. Falls er aber schon belegt ist, wird der Thread nicht blockiert, und *try\_lock* gibt *false* zurück. Mit *try\_lock* kann man aber nicht feststellen, ob der aktuelle Thread einen Mutex bereits belegt: Falls das zutrifft, ist das Ergebnis von *try\_lock* undefiniert. Da man aber meist nichts anderes machen kann, wenn der Mutex schon belegt ist, wird diese Funktion in der Praxis nur selten benötigt. Sie ist aber die Voraussetzung, damit Mutexe mit der Funktion *lock* gesperrt werden können, ohne dass dabei ein Deadlock auftritt.

Die Mutex-Klassen *std::timed\_mutex* und *std::recursive\_timed\_mutex* haben zusätzlich zu den Elementen von *std::mutex* und *std::recursive\_mutex* die Funktionen

```
template <class Rep, class Period>
bool try_lock_for(const chrono::duration<Rep, Period>& rel_time);

template <class Clock, class Duration>
bool try_lock_until(const chrono::time_point<Clock, Duration>& abs_time);
```

Diese blockieren den aufrufenden Thread und versuchen, innerhalb der angegebenen Zeit den Mutex zu bekommen. Falls das möglich ist, geben sie *true* zurück, und andernfalls *false*.

### Aufgabe 17.2.2

1. In der Klasse *SperreFrüherOderSpäter* soll *zeitaufwendige\_Operation* etwas länger dauern. Vergleichen Sie das Laufzeitverhalten von *starteThreads*, wenn entweder *SperreFrüher* oder *SperreSpäter* oft als Threads gestartet werden:

```

class SperreFrüherOderSpäter {
    std::mutex mtx;
    int kritischerBereich;
    int zeitaufwendigeOperation(int n) { return n; }

    void sperreFrüher()
    {
        std::lock_guard<std::mutex> lg(mtx);
        kritischerBereich = zeitaufwendigeOperation(17);
    }

    void sperreSpäter()
    {
        int n = zeitaufwendigeOperation(17);
        std::lock_guard<std::mutex> lg(mtx);
        kritischerBereich = n;
    }

public:
    void starteThreads()
    { /* Starte entweder sperreFrüher oder sperreSpäter oft als
                                           Threads */ }
};

```

2. Sehen Sie eine Möglichkeit, die Laufzeit von *starteThreads* zu verbessern?

```

class ZweiKritischeBereiche {
    std::mutex mtx;
    int kritischerBereich1;
    int kritischerBereich2;

    void Funktion1()
    {
        std::lock_guard<std::mutex> lg(mtx);
        // zeitaufwendige Operation mit kritischerBereich1
    }

    void Funktion2()
    {
        std::lock_guard<std::mutex> lg(mtx);
        // zeitaufwendige Operation mit kritischerBereich2
    }

public:
    void starteThreads()
    {
        // starte Funktion1 und Funktion2 in verschiedenen Threads
    }
};

```



3. Eine Klasse *Logger* soll eine Elementfunktion *log* enthalten, mit der man Meldungen in eine Textdatei schreiben kann. Bisher wurde diese Klasse nur für Programme ohne Multithreading eingesetzt:

```
class Logger { // sehr einfach, nur die Grundidee
    std::ofstream fout;
public:
    Logger(string fn)
    {
        fout.open(fn);
    }
    void log(string msg)
    {
        fout << msg << std::endl;
    }
};
```

Überarbeiten Sie die Klasse *Logger* zu einer Klasse *Multithread\_Logger*, so dass ihre Funktion *log* auch von verschiedenen Threads in einem Programm aufgerufen werden kann.

4. Ein Container *Multithread\_vector* soll eine Elementfunktion *push\_back* haben, mit der man von verschiedenen Threads aus Daten in den Container einfügen kann. Dieser Container soll mit einem *vector* der Standardbibliothek implementiert werden.
5. Welche Meldungen werden beim Start der Funktion *starteThreads* ausgegeben? Was kann man über die Reihenfolge dieser Meldungen sagen?

```
class MeineThreads {
    int Daten = 0;
    std::mutex mtx;

    void arbeite_im_kritischen_Bereich(int x)
    { // das lock_guard wäre hier effizienter
        Daten = Daten + x;
    }

    void Aufgabe(int n)
    { // das ist nicht effizient, es geht hier nur um den Ablauf!
        cout << "Aufgabe " << n << " vor lock " << endl;
        std::lock_guard<std::mutex> lk(mtx);
        cout << "Aufgabe " << n << " nach lock " << endl;
        std::this_thread::sleep_for(std::chrono::seconds(n));
        arbeite_im_kritischen_Bereich(1);
        cout << "Aufgabe " << n << " fertig " << endl;
    }

public: void starteThreads()
    {
        cout << "Am Anfang, Daten: " << Daten << endl;
        auto f1 = std::async(std::launch::async, [this]{Aufgabe(1);});
```

```

auto f2 = std::async(std::launch::async,
                    &MeineThreads::Aufgabe, this, 2);
auto f3 = std::async(std::launch::async,
                    &MeineThreads::Aufgabe, this, 3);
f1.get(); f2.get(); f3.get();
cout << "Am Ende, Daten: " << Daten << endl;
    }
};

```

### 17.2.3 Read/Write-Mutexe mit *shared\_mutex* und *shared\_lock*

In der Praxis hat man oft die Situation, dass gemeinsame Daten von bestimmten Threads nur gelesen, aber nicht verändert werden, während andere Threads diese Daten auch verändern. Da beim Lesen der Daten kein data race entstehen kann, muss man das Lesen der Daten nur sperren, wenn sie gerade aktualisiert werden. Diese Vorgehensweise wird auch als **Reader-Writer-Lock** bezeichnet. Falls die Daten oft gelesen und nur selten geändert werden, ist ein Reader-Writer-Lock schneller als ein exklusiver Lock. Falls die Daten nur von einem Thread geändert werden, kann im Unterschied zu einem exklusiven Lock auch kein **Deadlock** (siehe Abschnitt 17.2.5) eintreten.

Reader-Writer-Locks sind mit der seit C++17 nach

```
#include <shared_mutex>
```

verfügbaren Klasse *shared\_mutex* möglich. Diese Klasse hat neben den Funktionen *lock* und *unlock*, die den Mutex wie bei einem *mutex* exklusiv sperren, auch noch die beiden Funktionen

```
void lock_shared();
void unlock_shared();
```

die den Mutex nur dann sperren, wenn er exklusiv mit *lock* gesperrt ist. Verwendet man einen *shared\_mutex* mit einem *shared\_lock*, wird der kritische Bereich dann gesperrt, wenn er mit *lock\_guard* gesperrt wurde. Bei einer Sperre mit *shared\_lock* wird er nicht gesperrt.

Beispiel: Falls Daten häufig gelesen und nur selten geschrieben werden, ist es schneller, die Leseoperation nur mit *shared\_lock* und die Schreiboperationen mit *scoped\_lock* zu sperren:

```

class ReaderWriterLock_Cpp17
{
    std::shared_mutex rw_mtx;
    std::vector<int> v; // gemeinsame Daten
public:

    int read(int i) // Daten lesen mit shared_lock
    {
        std::shared_lock lock(rw_mtx);
        return v.at(i);
    }
}

```

```

void write(int value) // Daten schreiben mit scoped_lock
{
    std::scoped_lock lock(rw_mtx);
    v.push_back(value);
}
};

```

#### 17.2.4 Die Lock-Klasse *unique\_lock* Θ

Ein *unique\_lock* ermöglicht wie ein *scoped\_lock* bzw. *lock\_guard* einen exklusiven Zugriff. Im Unterschied zu diesen beiden kann ein Mutex mit *unique\_lock* aber auch wieder explizit freigegeben werden. Das ist z.B. bei Bedingungsvariablen (siehe Abschnitt 17.3) notwendig. Außerdem kann man damit Mutexe anlegen und verzögert sperren. Das kann notwendig sein, um bei mehreren Mutexen Deadlocks zu vermeiden (siehe Abschnitt 17.2.5). Zulässige Typ-Argumente sind dieselben wie bei *lock\_guard*.

Im Unterschied zu einem *scoped\_lock* bzw. *lock\_guard*, die im Wesentlichen nur zwei Konstruktoren und einen Destruktor haben, hat ein *unique\_lock* weitere Elementfunktionen. Die wichtigsten sind

```

template <class Mutex>
class unique_lock
{ // hier nur die Elemente, die für ein Grundverständnis notwendig
    sind

    typedef Mutex mutex_type;
    unique_lock() noexcept; // 1.
    unique_lock(unique_lock&& u) noexcept; // 2.
    explicit unique_lock(mutex_type& m); // 3.
    unique_lock(mutex_type& m, defer_lock_t) noexcept; // 4.
    unique_lock(mutex_type& m, adopt_lock_t); // 5.
    ~unique_lock();

    unique_lock& operator=(unique_lock&& u); // 6.

    void lock();
    void unlock();
    bool owns_lock() const noexcept;
private:
    mutex_type* pm;
};

```

Den Konstruktoren von *lock\_guard* muss ein Mutex übergeben werden, für den dann *lock* aufgerufen wird. Mit den Konstruktoren // 3. und // 5. von *unique\_lock* hat man dieselben Möglichkeiten. Verwendet man keine weiteren Elementfunktionen von *unique\_lock*, sind *unique\_lock* und *lock\_guard* gleichwertig. Dann ist aber ein *lock\_guard* besser, da mit ihm einige Fehlermöglichkeiten ausgeschlossen sind.

Die zusätzlichen Möglichkeiten eines *unique\_lock* sind:

- Ein *unique\_lock* hat einen Standardkonstruktor. Damit kann ein *unique\_lock* angelegt werden, ohne dass dieser einen Mutex besitzt. Der Mutex kann dann später mit dem Zuweisungsoperator zugewiesen werden.

```
std::mutex mtx;
std::unique_lock<std::mutex> u;
// ... später:
u = std::unique_lock<std::mutex>(mtx);
```

Während ein *lock\_guard* immer einen Mutex besitzt, muss das bei einem *unique\_lock* nicht der Fall sein. Mit der Funktion

```
bool owns_lock() const noexcept;
```

kann man prüfen, ob ein *unique\_lock* einen Mutex besitzt.

- Mit den Elementfunktionen

```
void lock();
void unlock();
```

kann man den Mutex auch explizit sperren und freigeben. Dieses *unlock* ist z.B. bei Bedingungsvariablen (siehe Abschnitt 17.3) notwendig. Deswegen ist für Bedingungsvariablen ein *lock\_guard* nicht ausreichend, sondern ein *unique\_lock* notwendig.

Ein *unique\_lock* bietet also praktisch alle Möglichkeiten, die man auch mit dem Mutex und einem expliziten Aufruf von *lock* und *unlock* hat. Der **wesentliche Unterschied** ist nur, dass der *unique\_lock* den Mutex im Destruktor freigibt, wenn er einen Mutex besitzt.

Beispiele für einen *unique\_lock* folgen in den Abschnitten 17.2.5 und 17.3.

### 17.2.5 Deadlocks

Wenn man mehrere kritische Bereiche hat, kann es sein, dass ein erster Thread einen sperrt, während ein zweiter Thread einen anderen sperrt. Wenn dann beide darauf warten, dass der andere den kritischen Bereich freigibt, spricht man von einem Deadlock.

Deadlocks kann man seit C++17 oft (aber nicht immer) mit *scoped\_lock* vermeiden. Im Folgenden soll zunächst gezeigt werden, wie solche Deadlocks entstehen können. Dann wird gezeigt, wie man diese Deadlocks in C++11 mit *std::lock* vermeiden kann, und danach, wie das in C++17 mit *scoped\_lock* einfacher geht.

Beispiel: Ruft man

```
void sperreMutexe(std::mutex& m1, std::mutex& m2)
{ // using std::mutex; using std::lock_guard;
  lock_guard<mutex> lock1(m1);
  std::cout << "Mutex m1 bekommen" << std::endl;
  Sleep_ms(100); // damit der andere Thread genug Zeit hat,
  // den Mutex zu sperren, bevor diese Funktion fertig ist.
  lock_guard<mutex> lock2(m2);
```

```

        std::cout << "Mutex m2 bekommen" << std::endl;
    }

    mutex mtx_1, mtx_2;

```

von zwei verschiedenen Threads aus auf, werden in beiden Threads zunächst die Anweisungen bis zu *Sleep\_ms(1000)* ausgeführt:

```

void sperre_in_umgekehrter_Reihenfolge() // Deadlock
{
    thread t1 = thread([] { sperreMutexe(mtx_1, mtx_2); });
    thread t2 = thread([] { sperreMutexe(mtx_2, mtx_1); });
    t1.join();
    t2.join();
}

```

Dadurch wird *mtx\_1* vom ersten Thread *t1* und *mtx\_2* vom zweiten Thread *t2* gesperrt. Nach dem Ablauf der Wartezeit will *t1* *mtx\_2* sperren, das aber bereits von *t2* gesperrt ist. Deshalb muss *t1* warten. Da *t2* aber auf die Freigabe von *mtx\_1* wartet, ist das gesamte Programm blockiert.

Sperrt man die Mutexe dagegen von beiden Threads aus in derselben Reihenfolge, tritt kein Deadlock auf:

```

void sperre_in_gleicher_Reihenfolge() // kein Deadlock
{
    thread t1 = thread([] { sperreMutexe(mtx_1, mtx_2); });
    thread t2 = thread([] { sperreMutexe(mtx_1, mtx_2); });
    t1.join();
    t2.join();
}

```

Dieses Beispiel zeigt bereits eine mögliche Ursache für Deadlocks: Wenn zwei Threads zwei Mutexe sperren, kann ein Deadlock auftreten, wenn beide Threads die Mutexe in einer unterschiedlichen Reihenfolge sperren. Sperren die Threads sie dagegen in derselben Reihenfolge, kann kein Deadlock auftreten.

Das ist bereits eine erste Möglichkeit, **Deadlocks** zu **verhindern**: Wenn alle Threads alle Mutexe in derselben Reihenfolge sperren, kann kein Deadlock auftreten. Diese Anforderung ist aber nicht immer einfach umzusetzen. Deadlocks kann man gelegentlich auch dadurch vermeiden, dass man mehrere Mutexe vermeidet und

- nur atomare Operationen verwendet, oder
- maximal nur einen Mutex verwendet.

Mit der seit C++17 verfügbaren Klasse

```
template< class... MutexTypes >
class scoped_lock
{
    explicit scoped_lock(MutexTypes&... m);
    ...
};
```

kann man mehrere Mutexe in einem Block sperren. Wenn dabei mehrere Mutexe angegeben werden, wird wie mit der anschließend vorgestellte Funktion `std::lock` versucht, Deadlocks zu vermeiden.

Beispiel: Startet man die Funktion

```
void sperre_mit_scoped_lock(std::mutex& m1, std::mutex& m2)
{ // #include <mutex>
  std::scoped_lock lock1(m1, m2); //oder scoped_lock<mutex>
  std::cout << "Mutex m1 und m2 bekommen" << std::endl;
}
```

mehrfach in einem Thread, erhält man weder mit

```
thread t1 = thread(
  [] { sperre_mit_scoped_lock(mtx_1, mtx_2); });
thread t2 = thread(
  [] { sperre_mit_scoped_lock(mtx_2, mtx_1); });
t1.join(); t2.join();
```

noch mit

```
thread t1 = thread(
  [] { sperre_mit_scoped_lock(mtx_1, mtx_2); });
thread t2 = thread(
  [] { sperre_mit_scoped_lock(mtx_1, mtx_2); });
t1.join(); t2.join();
```

einen Deadlock.

Vor C++17 konnte man mehrere Mutexe mit den **generischen lock-Algorithmen** sperren:

```
template <class L1, class L2, class... L3>
void lock(L1&, L2&, L3&...);
```

```
template <class L1, class L2, class... L3>
int try_lock(L1&, L2&, L3&...);
```

Die Argumente müssen Mutexe (Typ-Parameter L1, L2 usw.) sein, die wie

```
std::mutex      std::recursive_mutex  std::timed_mutex  std::recursive_timed_mutex
std::shared_mutex, std::unique_lock
```

die Elemente `lock()`, `unlock()` und `try_lock()` enthalten. `std::lock` verwendet einen Algorithmus, der alle Argumente so sperrt, dass dabei keine Deadlocks auftreten. Vor dem Aufruf von `std::lock` dürfen die Argumente nicht gesperrt sein. Damit die Mutexe auch wieder freigegeben werden, überträgt man sie anschließend in einen `lock_guard` oder einen `unique_lock`, damit der Destruktor auch definitiv aufgerufen wird. Dazu kann man folgendermaßen vorgehen:

- Entweder sperrt man die Mutexe zuerst mit `std::lock` und überträgt danach jeden in einen `lock_guard`. Das ist mit dem `lock_guard`-Konstruktor mit dem zweiten Argument `std::adopt_lock` möglich. Mit diesem Konstruktor wird ein bereits gesperrter Mutex in das `lock_guard`-Objekt verschoben. Der Mutex wird dann vom Destruktor des `lock_guard`-Objekts wieder freigegeben. Falls der übergebene Mutex nicht gesperrt ist, ist das Verhalten undefiniert.
- Oder man legt zuerst einen `unique_lock` an, der aber noch keinen Mutex sperrt. Das ist mit dem zweiten `unique_lock`-Argument `std::defer_lock` möglich.

Beide Vorgehensweisen sind gleichwertig.

Beispiel: Sowohl mit

```
void sperre_mit_std_lock_1(std::mutex& m1, std::mutex& m2)
{ // using std::mutex; using std::lock_guard;
  std::lock(m1, m2);
  std::lock_guard<std::mutex> lg1( m1, std::adopt_lock );
  std::lock_guard<std::mutex> lg2{ m2, std::adopt_lock };
  Sleep(1000ms);
  std::cout << "Mutex m1 bekommen" << std::endl;
  std::cout << "Mutex m2 bekommen" << std::endl;
}
```

als auch mit

```
void sperre_mit_std_lock_2(std::mutex& m1, std::mutex& m2)
{ // using std::mutex; using std::lock_guard;
  std::unique_lock<mutex> u1{ m1, std::defer_lock };
  std::unique_lock<mutex> u2{ m2, std::defer_lock };
  Sleep(1000ms);
  std::lock(u1, u2);
  std::cout << "Mutex m1 bekommen" << std::endl;
  std::cout << "Mutex m2 bekommen" << std::endl;
}
```

führen die Aufrufe

```
void sperre_in_umgekehrter_Reihenfolge_mit_std_lock_1()
{
  std::mutex mtx_1, mtx_2;
  thread t1 = thread([&] {
    sperre_mit_std_lock_1(std::ref(mtx_1), std::ref(mtx_2));
  });
}
```

```

thread t2 = thread([&] {
    sperre_mit_std_lock_1(std::ref(mtx_2), std::ref(mtx_1));
});
t1.join();
t2.join();
}

void sperre_in_umgekehrter_Reihenfolge_mit_std_lock_2()
{
    std::mutex mtx_1, mtx_2;
    auto f1 = std::async(sperre_mit_std_lock_2,
                        std::ref(mtx_1), std::ref(mtx_2));
    auto f2 = std::async(sperre_mit_std_lock_2,
                        std::ref(mtx_2), std::ref(mtx_1));

    f1.get();
    f2.get();
}

```

zu keinem Deadlock. Man erhält die Meldungen

```

Mutex m1 bekommen
Mutex m2 bekommen
Mutex m1 bekommen
Mutex m2 bekommen

```

### 17.2.6 *call\_once* zur Initialisierung von Daten

Mit dem nach

```
#include <mutex>
```

verfügbaren Funktions-Template

```

template<class Callable, class ...Args>
void call_once(once_flag& flag, Callable&& func, Args&&... args);

```

kann man erreichen, dass die als Argument für *func* übergebene Funktion nur ein einziges Mal ausgeführt wird, und zwar auch dann, wenn sie von mehreren Threads aufgerufen wird.

Das erste Argument des Typs *once\_flag* gewährleistet, dass *call\_once* die zu *func* gehörenden Anweisungen nur ein einziges Mal ausführt. Es ist so implementiert, dass auch bei einem mehrfachen Aufruf von *call\_once* kein kritischer Wettlauf oder ein Deadlock auftreten kann.

Das nächste Argument ist die Funktion, die nur einmal aufgerufen werden soll. Darauf folgen die Argumente für diese Funktion.

Beispiel: Durch



```

void init(int n, string msg)
{
    cout << n << msg << endl;
}

void callOnce()
{
    std::once_flag flag1;
    thread t1 = thread([&flag1] {std::call_once(flag1, init,
                                                1, "Aufruf"); });
    thread t2 = thread([&flag1] {std::call_once(flag1, init,
                                                2, "Aufruf"); });

    t1.join();
    t2.join();
}

```

erhält man nur eine Meldung ausgegeben. Ob das „Aufruf 1“ oder „Aufruf 2“ ist, kann man nicht vorher entscheiden.

### 17.2.7 Thread-lokale Daten

Mit dem Schlüsselwort ***thread\_local*** kann man Thread-lokale Variablen definieren. Das sind globale oder lokale Variablen, die beim Start eines Threads angelegt werden und so lange existieren, wie der Thread ausgeführt wird. Mit dem Ende des Threads werden sie wieder freigegeben. Da sie zu einem Thread gehören, behalten sie ihre Werte zwischen zwei verschiedenen Aufrufen eines Threads.

Beispiel: Die Funktion *show\_thread\_local* gibt genau eine der Zeichenfolgen „2349“, „2439“, „3249“, „3429“, „4239“ oder „4329“ aus:

```

thread_local int i = 0; // global

void threadfunc(int n)
{
    i = n;
    i++;
    std::cout << i;
}

void show_thread_local()
{
    i = 9;
    std::thread t1(threadfunc, 1);
    std::thread t2(threadfunc, 2);
    std::thread t3(threadfunc, 3);
    t1.join(); t2.join(); t3.join();
    std::cout << i << std::endl;
}

```

## 17.3 Bedingungsvariablen zur Synchronisation von Threads

Mit den nach

```
#include <condition_variable>
```

verfügbaren Bedingungsvariablen des Datentyps *condition\_variable* kann man Threads synchronisieren: Ein Thread (oder auch mehrere) warten (werden blockiert), bis sie von einem anderen Thread über die Bedingungsvariable wieder aktiviert werden. Alle Threads greifen dabei normalerweise auf gemeinsame Daten zu.

Ein typischer Anwendungsfall besteht aus einem Thread, der Daten in einen Container ablegt und der als **Produzent** bezeichnet wird. Er benachrichtigt dann einen anderen Thread, der bisher blockiert war (durch den Aufruf einer *wait*-Funktion), durch einen Aufruf einer *notify*-Funktion. Dieser andere Thread (der auch als **Konsument** bezeichnet wird) wird dadurch aktiviert und holt die Daten aus dem Container ab.

Dazu kann man im Prinzip (eine genauere Vorgehensweise folgt anschließend) folgendermaßen vorgehen:

- Die Synchronisation erfolgt über einen Mutex und eine Bedingungsvariable. Dazu definiert man z.B. in einer Klasse Variablen wie

```
class ProduzentUndVerbraucher {
    std::mutex mtx;
    std::condition_variable cv;
```

Falls mehrere Threads warten sollen, ist für jeden Thread ein Mutex notwendig. Für alle Threads reicht aber eine einzige Bedingungsvariable aus. Die gemeinsamen Daten sollen in diesem einführenden Beispiel ein First-In-First-Out Container sein, damit die Daten in derselben Reihenfolge abgeholt werden:

```
std::queue<int> gemeinsameDaten;
```

Das folgende Beispiel benötigt außerdem noch eine boolesche Variable, mit der der Produzent dem Verbraucher mitteilt, dass er fertig ist:

```
bool fertig = false;
```

- Ein Thread, der warten soll (typischerweise der **Konsument**),
  - a) belegt den Mutex mit einem *unique lock*, um die gemeinsamen Daten zu schützen.
  - b) ruft *wait*, *wait\_for* oder *wait\_until* mit der Bedingungsvariablen auf. Diese *wait*-Operationen geben den Mutex wieder frei und blockieren die Ausführung des Threads.
  - c) Wenn die Bedingungsvariable benachrichtigt wird oder ein Timeout abläuft, wird der Thread geweckt und der Mutex automatisch wieder erworben.

Diese Freigabe des Mutex über die Bedingungsvariable in b) durch *wait*, und seine erneute Sperre in c) sind die entscheidende Grundlage für die Synchronisation. Die

nachträgliche Freigabe und Sperre sind auch der Grund, wieso hier ein *unique\_lock* notwendig ist. Mit einem *lock\_guard* wäre diese Freigabe nicht möglich.

```
void verbrauche()
{
    while (!fertig)
    {
        std::unique_lock<std::mutex> lock(mtx);
        cv.wait(lock); // das Argument muss ein unique_lock sein
        while (!gemeinsameDaten.empty())
        {
            std::cout << "konsumiere " << gemeinsameDaten.front() <<
                std::endl;
            gemeinsameDaten.pop();
        }
    } // lock wieder freigeben
}
```

- Der Thread, der den wartenden Thread wieder aktivieren will (typischerweise ein **Produzent**),
  - a) belegt denselben Mutex wie der wartende Thread. Hier reicht ein *std::lock\_guard*
  - b) verändert die Variable
  - c) ruft mit der Bedingungsvariablen *notify\_one* oder *notify\_all* auf. Dieser Aufruf aktiviert den wartenden Thread.

```
void produziere(int n)
{
    for (int i = 0; i < n; i++)
    {
        std::this_thread::sleep_for(std::chrono::seconds(1));
        std::lock_guard<std::mutex> lock(mtx); // hier reicht lock_guard

        std::cout << "produziere " << i << std::endl;
        gemeinsameDaten.push(i);
        cv.notify_one();
    }
    fertig = true;
}
```

Beispiel: Nimmt man alle diese Funktionen und Daten in die Klasse *ProduzentUndVerbraucher* auf sowie noch die Funktion

```
public:
    void starte(int n)
    { // Nur zur Illustration einmal als Funktion und einmal
        // als Lambda

        std::thread t1 = std::thread(
            &ProduzentUndVerbraucher::verbrauche, this);
        std::thread t2=std::thread([n,this]{ produziere(n); });
        t1.join();
    }
```

```

        t2.join();
        std::cout << "fertig" << std::endl;
    }
}; // end of class ProduzentUndVerbraucher

```

erhält man bei einem Aufruf dieser Funktion mit dem Argument 3 eine Ausgabe wie:

```

produziere 0
konsumiere 0
produziere 1
konsumiere 1
produziere 2
konsumiere 2
fertig

```

Die bisher beschriebene Vorgehensweise wird in den allermeisten Fällen funktionieren. Es kann allerdings vorkommen, dass ein sogenannter „**spurious wakeup**“ vorkommt: Ein Thread wird aufgeweckt, ohne dass er von einer Bedingungsvariablen benachrichtigt wurde. Dieser Fall dürfte eigentlich nie eintreten, kann aber bei den meisten Betriebssystemen vorkommen.

Es ist aber einfach möglich, diese Fälle zu erkennen: Man setzt eine boolesche Variable wie

```
bool notified = false;
```

1. im Produzenten vor dem Aufruf von *notify* auf *true*,

```

notified = true; // vor notify einfügen
cv.notify_one();

```

2. Im Konsumenten prüft man, ob sie auch tatsächlich den Wert *true* hat. Dazu ersetzt man

```
cv.wait(lock); // das Argument muss ein unique_lock sein
```

durch

```

while (!notified)
{ // bei einem spurious wakeup weiter warten
    cv.wait(lock);
}

```

Nachdem der Konsument die Arbeiten abgeschlossen hat, die er aufgrund der Benachrichtigung ausführen wollte, setzt er diese boolesche Variable wieder zurück:

```
notified = false;
```

Arbeitet man diese Änderungen in die Funktionen von oben ein, erhält man:

```

void verbrauche()
{

```

```

while (!fertig)
{
    std::unique_lock<std::mutex> lock(mtx);
    while (!notified)
    { // bei einem spurious wakeup weiter warten
        cv.wait(lock);
    }
    while (!gemeinsameDaten.empty())
    {
        std::cout << "konsumiere " << gemeinsameDaten.front() <<
                                                    std::endl;
        gemeinsameDaten.pop();
    }
    notified = false;
} // lock wieder freigeben
}

void produziere(int n)
{
    for (int i = 0; i < n; i++)
    {
        std::this_thread::sleep_for(std::chrono::seconds(1));
        std::lock_guard<std::mutex> lock(mtx); // hier reicht lock_guard
        std::cout << "produziere " << i << std::endl;
        gemeinsameDaten.push(i);
        notified = true; // vor notify einfügen
        cv.notify_one();
    }
    fertig = true;
}

```

## 17.4 Die „Parallel Patterns Library“ von Microsoft

In Visual C++ steht neben den Multithreading-Möglichkeiten von Standard-C++ auch noch die Parallel Pattern Library (PPL) zur Verfügung. Da diese oft bessere Möglichkeiten als Standard-C++ zur Verfügung stellt, soll sie kurz vorgestellt werden.

Die PPL besteht im Wesentlichen aus drei Algorithmen:

```

template <typename Index_type, typename Function>
void parallel_for(Index_type First, Index_type Last, const Function& Func);

template <typename Iterator, typename Function>
void parallel_for_each(Iterator First, Iterator Last, const Function& Func);

```

**parallel\_invoke** können zwei bis zehn Funktionen übergeben werden, die dann parallel ausgeführt werden.

Diesen kann man Funktionen (Funktoeren, Lambda-Ausdrücke usw.) übergeben, die dann parallel ausgeführt werden. Die PPL

- verwendet einen Thread-Pool. Damit werden auch kurze Threads schneller ausgeführt.
- hat konkurrente Container, in die man ohne explizite Synchronisation von verschiedenen Threads aus Daten ablegen kann:

|                                 |                                      |
|---------------------------------|--------------------------------------|
| <i>concurrent_vector</i>        | <i>concurrent_queue</i>              |
| <i>concurrent_unordered_map</i> | <i>concurrent_unordered_multimap</i> |
| <i>concurrent_unordered_set</i> | <i>concurrent_unordered_multiset</i> |

- bietet Möglichkeiten, Threads abzurechnen

Beispiel: Die folgenden Anweisungen sollen nur zeigen, wie einfach man mit den concurrent-Containern arbeiten kann:

```
#include <ppl.h>
#include <concurrent_vector.h>

using namespace Concurrency;

void fibo_ppl()
{
    std::vector<int> args = {43,42,41,40};
    concurrent_vector<std::tuple<int, long long>> results;
    BenchmarkTimer t_ppl("fibo PPL: ", [args, &results] {
        // verwende die parallele PPL-Variante von for_each:
        parallel_for_each(args.begin(),args.end(), [&](int n) {
            results.push_back(std::make_tuple(n, fibo(n))); }
        );

        // Da die verschiedenen Threads parallel laufen,
        // liefern sie die Ergebnisse in einer unbestimmten
        // Reihenfolge ab. Deswegen sortieren:
        sort(results.begin(), results.end());
    });
    t_ppl.ShowDuration();
    for_each(results.begin(), results.end(),
        [](std::tuple<int, int>& pair)
    { // Ergebnisse ausgeben:
        cout << "fib(" << std::get<0>(pair) << "): " <<
            std::get<1>(pair) << endl;
    });
}
```

## 18 Smart Pointer: *shared\_ptr*, *unique\_ptr* und *weak\_ptr*

Die Arbeit mit Zeigern auf dynamisch erzeugte Speicherbereiche ist oft fehleranfällig.

Beispiel: Obwohl die beiden Funktionen

```
int* pi;  
int* pj;  
  
void initPtr()  
{  
    pi = new int(17);  
    pj = new int(18);  
}  
  
void finitPtr()  
{  
    delete pi;  
    delete pj;  
}
```

auf den ersten Blick korrekt aussehen und die Anforderung erfüllen, dass zu jedem *new* ein *delete* gehört, sind mit ihnen trotzdem z.B. diese Probleme möglich:

- Wenn zwischen den Aufrufen der beiden Funktionen eine Zuweisung

```
pi = pj;
```

stattfindet, ist das Ergebnis der zweiten *delete*-Operation undefiniert.

- Falls zwischen den beiden Aufrufen eine Exception (siehe Kapitel 10) ausgelöst wird, die erst in einem umgebenden Block abgefangen wird, ist ein Speicherleck die Folge.

Solche Fehler kann man seit C++11 mit **smart Pointern** des Typs *shared\_ptr* oder *unique\_ptr* vermeiden, die auch eine effiziente Form der **Garbage Collection** darstellen. Sie sind verfügbar nach

```
#include <memory> // oder import std.memory; (siehe Abschnitt 2.14)  
using namespace std; // bzw. using std::shared_ptr; std::unique_ptr;
```

In älteren Versionen von C++ wurde versucht, mit der Klasse *auto\_ptr* ähnliche Möglichkeiten zu schaffen. Diese Klasse hat aber gravierende Schwächen, da C++ damals noch keine move-Semantik kannte. Deshalb wurde *auto\_ptr* in C++11 als deprecated gekennzeichnet und in C++17 aus dem C++-Standard entfernt.

Ein Objekt des Typs *unique\_ptr<T>* bzw. *shared\_ptr<T>* enthält einen Zeiger des Typs T\*, der normalerweise auf einen mit *new* erzeugten Speicherbereich zeigt. Der smart pointer ist dann dafür verantwortlich, dass dieser Speicherbereich wieder richtig freigegeben wird.

Der wesentliche Unterschied zwischen diesen beiden smart pointern ist:

- Auf den Speicherbereich, auf den der Zeiger in einem *unique\_ptr* zeigt, kann nur dieser und kein anderer *unique\_ptr* zeigen. Diese eindeutige Zuordnung wird dadurch erreicht, dass keine Zuweisungen usw. möglich sind. Im Beispiel oben wäre das Problem mit *delete* ohne die Zuweisung `pi=pj` nicht entstanden.
- Für *shared\_ptr* sind solche Zuweisungen usw. dagegen möglich. Dann zeigen die Zeiger in mehreren *shared\_ptr* auf denselben Speicherbereich. Dieser Speicher darf erst dann wieder mit *delete* freigegeben werden, wenn keine anderen Zeiger mehr existieren, die auf diesen Speicher zugreifen können. Wenn im Beispiel oben das erste *delete* nicht stattgefunden hätte, wäre ebenfalls kein Problem entstanden.

Die Freigabe des Speicherbereichs wird normalerweise folgendermaßen durchgeführt:

- Bei einem *unique\_ptr* wird der Speicherbereich dann wieder freigegeben, wenn der *unique\_ptr* den Gültigkeitsbereich verlässt, in dem er definiert wurde. Intern wird das einfach mit einem *delete* im Destruktor erreicht (RAII).
- Bei einem *shared\_ptr* wird der Speicherbereich erst dann wieder freigegeben, wenn der letzte *shared\_ptr* den Gültigkeitsbereich verlässt, in dem er definiert wurde. Das wird intern mit einem Referenzzähler erreicht, der vom ersten *shared\_ptr* auf 1 gesetzt wird. Mit jedem neuen *shared\_ptr*, der infolge einer Zuweisung auf den Speicherbereich zeigt, erhöht man den Zähler um 1 (z.B. im Kopierkonstruktor oder Zuweisungsoperator). Verlässt ein *shared\_ptr* den Gültigkeitsbereich, wird der Referenzzähler im Destruktor um 1 reduziert. Erst dann, wenn der Zähler den Wert 0 erreicht, wird der Speicher wieder freigegeben.

## 18.1 Gemeinsamkeiten von *unique\_ptr* und *shared\_ptr*

Die Klassen *unique\_ptr<T>* und *shared\_ptr<T>* haben viele Gemeinsamkeiten, die zuerst beschrieben werden sollen. Die Unterschiede folgen dann in den nächsten beiden Abschnitten.

Ein *unique\_ptr* bzw. *shared\_ptr* Objekt wird dadurch definiert, dass man in spitzen Klammern den Datentyp angibt, auf den der Zeiger zeigen soll. Eine Variable dieses Datentyps kann dann im Wesentlichen wie ein gewöhnlicher Zeiger verwendet werden.



Beispiel: Hier sind nach den smart pointer Anweisungen als Kommentar entsprechende Anweisungen für gewöhnliche Zeiger angegeben:

```
shared_ptr<int> s1;           // int* s1;
shared_ptr<int> s2(new int(17)); // int* s2=new int(17);
shared_ptr<int> s3{ new int(17)}; // int* s3={new int(17)};
unique_ptr<int> u1;           // int* u1;
unique_ptr<int> u2(new int(17)); // int* u2=new int(17);
unique_ptr<int> u3{ new int(17)}; // int* u3={new int(17)};
```

Mit einer Klasse wie

```
class C {
public:
    virtual void f()
    {
        cout << "C::f" << endl;
    }

    virtual ~C()
    {
        cout << "Destruktor C" << endl;
    }
};
```

sind die folgenden Definitionen möglich:

```
{
shared_ptr<C> sp(new C()); // C* sp = new C();
unique_ptr<C> up(new C()); // C* up = new C();
};
```

Führt man diese Anweisungen in einem Block aus, wird beim Verlassen des Blocks der Destruktor aufgerufen:

```
Destruktor C
Destruktor C
```

Ein `unique_ptr` benötigt genauso viel Speicher wie ein gewöhnlicher Zeiger. Ein `shared_ptr` enthält noch einen zusätzlichen Referenzzähler:

```
int y2 = sizeof(C*);           // x86: 4, x64: 8
int s2 = sizeof(std::shared_ptr<C>); // x86: 8, x64: 16
int u2 = sizeof(std::unique_ptr<C>); // x86: 4, x64: 8
```

Das letzte Beispiel sollte vor allem zeigen, dass ein smart pointer einen gewöhnlichen Zeiger enthält und für diesen automatisch `delete` aufruft. Zum Anlegen eines smart pointers sollte man aber besser die Funktions-Templates

```
template <class T, class... Args>
shared_ptr<T> make_shared(Args&&... args);
```

und

```
template <class T, class... Args>
unique_ptr<T> make_unique(Args&&... args);
```

verwenden. Diese erzeugen das Objekt intern mit *new*, vermeiden aber das Argument *new*, sind effizienter und exception-sicher. Hier ist *T* der Datentyp, auf den die Zeiger zeigen. Es gibt nur wenige Situationen, bei denen *make\_shared* und *make\_unique* nicht eingesetzt werden können.

Diesen Funktions-Templates werden die Argumente für die Konstruktoren übergeben. Zu diesen Argumenten sucht der Compiler einen passenden Konstruktor, der dann mit den Argumenten aufgerufen wird.

Beispiel: Die nächsten Definitionen haben denselben Effekt wie die im letzten Beispiel, sind aber übersichtlicher und effizienter:

```
shared_ptr<int> s = std::make_shared<int>(17);
unique_ptr<int> u = std::make_unique<int>(17);

shared_ptr<C> sc = std::make_shared<C>();
unique_ptr<C> uc = std::make_unique<C>();
```

Ergänzt man die Klasse *C* um einen Konstruktor

```
C(int x, string s) {};
```

kann man die Argumente für den Konstruktor als Argumente an *make\_shared* und *make\_unique* übergeben:

```
shared_ptr<C> sc = std::make_shared<C>(1, "a");
unique_ptr<C> uc = std::make_unique<C>(2, "b");
```

Seit C++17 muss das Typ-Argument nicht mehr angegeben werden, da es der Compiler aus dem Datentyp von *make\_shared* bzw. *make\_unique* ableiten kann.

Beispiel: Anstatt

```
shared_ptr<C> sc = make_shared<C>();
unique_ptr<C> uc = make_unique<C>();
```

kann man seit C++17 auch etwas kürzer schreiben:

```
shared_ptr sc = make_shared<C>();
unique_ptr uc = make_unique<C>();
```

Bei einer Codeanalyse mit den C++ Core Guidelines (siehe Abschnitt 2.13) wird empfohlen, anstelle von *new* einen smart pointer und *make::unique* zu verwenden:

```
int* p = new int; // warning C26409: Rufen Sie "new" und "delete"
nicht explizit auf, verwenden Sie stattdessen
"std::make_unique<T>" (r.11).
```

Mit der Bemerkung, dass ein smart pointer im Wesentlichen wie ein gewöhnlicher Zeiger verwendet werden kann, ist vor allem gemeint, dass man die Elemente der Klasse wie bei einem gewöhnlichen Zeiger ansprechen kann.

Beispiel: Mit den Definitionen aus den letzten Beispielen kann die Elementfunktion `f` wie über einen gewöhnlichen Zeiger aufgerufen werden:

```
sc->f();
uc->f();
```

Außerdem kann ein smart pointer wie ein gewöhnlicher Zeiger dereferenziert werden:

```
cout << "*s=" << *s << " *u=" << *u << endl; // *s=17 *u=17
```

Wenn also ein Zeiger nach dem Verlassen eines Blocks wieder freigegeben werden soll, kann man mit einem *unique\_ptr* bzw. *shared\_ptr* sicherstellen, dass der Aufruf von *delete* nicht vergessen werden kann. Das gilt auch für Container, die Zeiger enthalten.

Beispiel: Nach dem Verlassen eines Blocks mit den Anweisungen

```
using std::vector; // #include <vector>
vector<shared_ptr<C>> vs = { std::make_shared<C>(2, "") };
vector<unique_ptr<C>> vu;
vu.push_back(std::make_unique<C>(2, ""));
```

wird der Destruktor für jedes Element des Containers aufgerufen. Bei einem Container mit gewöhnlichen Zeigern

```
std::vector<C*> vp = { new C(17) };
```

muss dagegen jedes Element explizit gelöscht werden:

```
for (auto& pi : vp) delete pi;
```

Die Klassen *unique\_ptr* bzw. *shared\_ptr* implementieren das **RAII**-Konzept, das heißt sie rufen im Destruktor für den enthaltenen Zeiger *delete* auf. Da ein Destruktor automatisch aufgerufen wird

- beim Verlassen eines Blocks
- beim Aufruf des Destruktors einer Klasse für alle enthaltenen Elemente eines Klassentyps
- beim Aufruf von *delete* für einen Zeiger auf eine Variable eines Klassentyps

sind smart pointer immer dann angemessen, wenn beim Aufruf eines Destruktors der zugehörige Speicherbereich automatisch freigegeben werden soll.

Beispiel: Mit den Definitionen aus dem vorletzten Beispiel wird nach dem Verlassen des Blocks

```
{
    shared_ptr<C> sc = std::make_shared<C>();
    unique_ptr<C> uc = std::make_unique<C>();
}
```

automatisch der jeweilige Destruktor aufgerufen, so dass die Meldungen

```
Destruktor C
Destruktor C
```

ausgegeben werden.

Enthält eine Klasse einen Zeiger auf einen dynamisch erzeugten Speicher, muss man einen Destruktor definieren, der den Speicher mit *delete* wieder freigibt, sowie einen Kopierkonstruktor und einen Zuweisungsoperator. Ersetzt man den Zeiger durch einen smart pointer, sind alle diese Funktionen nicht mehr notwendig.

Beispiel: Ersetzt man den Zeiger in E

```
class E
{
    int* p;
public:
    E(int x): p(new int(x)) { }
    E(const E& e){ /* Kopierkonstruktor, siehe Abschnitt
                                                           8.2.5 */ }
    E& operator=(const E& x) { /* Zuweisungsoperator, siehe
                                                           Abschnitt 8.2.7 */ }
    ~E() { delete p; }
};
```

durch einen smart pointer, kann man sich den Destruktor usw. sparen:

```
class E
{
    std::shared_ptr<int> s;
public:
    E(int x): s(std::make_shared<int>(x)) { }
}; // kein Destruktor, Kopierkonstruktor, operator= notwendig
```

Da smart pointer RAII implementieren, sind sie auch nur dann sinnvoll, wenn RAII sinnvoll ist.

- Wenn ein dynamisch reservierter Speicherbereich nur über eine einzige Variable angesprochen werden soll, ist ein *unique\_ptr* als Datentyp für diese Variable angemessen. Dieser *unique\_ptr* ist dann der **alleinige Verantwortliche** für die Verwaltung des Speicherbereichs.
- Wenn ein dynamisch reservierter Speicherbereich über mehrere Variablen angesprochen werden soll, ist ein *shared\_ptr* als Datentyp für diese Variablen angemessen. Diese *shared\_ptr* sind dann **gemeinsam** für die Verwaltung des Speicherbereichs verantwortlich.

- Wenn es **keinen Verantwortlichen** für einen Speicherbereich gibt, sind gewöhnliche Zeiger angemessen.

Beispiel: In einer verketteten Liste gibt es keinen alleinigen oder gemeinsamen Verantwortlichen für einen Knoten. RAII für einen einzelnen Knoten macht keinen Sinn, da ein Knoten nicht einfach nur gelöscht werden kann, sondern die Verweise in den Knoten davor und danach beim Löschen umgehängt werden müssen. Falls eine Klasse für eine verkettete Liste einen Zeiger auf den ersten Knoten enthält, hilft die Freigabe des ersten Knotens nichts, da danach die anderen Knoten der Liste als memory leak bleiben.

Normalerweise verwendet man einen smart pointer wie einen Zeiger. Eine der wenigen Ausnahmen: An eine Funktion sollte man keinen smart pointer als Parameter übergeben, sondern nur das Objekt, auf das er zeigt.

Beispiel: Anstelle von einem smart pointer

```
void f_sp(std::shared_ptr<C>& p) // normalerweise nicht gut
{
    p->f(); //verwende nur das Objekt, aber nicht den shared_ptr
}
```

übergibt man besser eine Referenz oder einen Zeiger auf das Objekt:

```
void f_sp1(C& p) // besser als ein smart pointer Parameter
{
    p.f();
}
```

Diese Funktion kann man dann mit einem dereferenzierten smart pointer aufrufen:

```
std::shared_ptr<C> sc = std::make_shared<C>();
f_sp1(*sc);
std::unique_ptr<C> uc = std::make_unique<C>();
f_sp1(*uc);
```

Bei einer Codeanalyse mit den C++ Core Guidelines (siehe Abschnitt 2.13) wird eine solche Parameterübergabe empfohlen.

```
int smartPointerParameter(shared_ptr<int> w, shared_ptr<int>& r)
{ // warning C26415: Der Parameter für intelligente Zeiger "w" wird
  // nur für den Zugriff auf einen enthaltenen Zeiger verwendet.
  // Verwenden Sie stattdessen "T*" oder "T& " (r.30).
  // C26417: Der Parameter für den gemeinsamen Zeiger "r" wird durch
  // einen Verweis übergeben und nicht zurückgesetzt oder
  // zugewiesen. Verwenden Sie stattdessen "T*" oder "T& "(r.35).
  return *w + *r;
}
```

Die Klassen `unique_ptr` bzw. `shared_ptr` haben einen **Standardkonstruktor**, mit dem ein Objekt erzeugt wird, das einen Zeiger mit dem Wert `nullptr` enthält. Ein solches Objekt wird auch als **leerer smart pointer** bezeichnet. Wenn der Destruktor für einen leeren smart pointer aufgerufen wird, hat das keinen Aufruf von `delete` für den enthaltenen Zeiger und auch keine anderen Anweisungen zur Folge.

Beispiel: Nach dem Verlassen eines Blocks mit den Anweisungen

```
unique_ptr<C> u;
shared_ptr<C> s;
```

wird der Destruktor von C weder für u noch für s aufgerufen, d.h. das Verlassen des Blocks hat keine Auswirkungen.

Den in einem `unique_ptr` bzw. `shared_ptr` enthaltenen Zeiger erhält man mit der Elementfunktion

```
T* get() const noexcept;
```

Normalerweise besteht keine Notwendigkeit, `get` aufzurufen. Der interne Zeiger ermöglicht aber den Aufruf von Funktionen, die früher einmal für Zeiger geschrieben wurden.

Beispiel: Wenn eine Funktion mit einem Zeiger-Parameter aufgerufen werden soll, deren Quelltext nicht zur Verfügung steht,

```
void alteFunktion(int* p) { }
```

kann man das Programm trotzdem auf smart pointer umstellen und diese mit `get` übergeben:

```
alteFunktion(u.get());
```

Da der Speicher, auf den der Zeiger in einem smart pointer zeigt, vom Destruktor des smart pointers freigegeben wird, darf die Funktion diesen nicht mit `delete` freigeben. Ein `delete` mit einem von `get` zurückgegebenen Wert hat ein undefiniertes Verhalten (meist eine Zugriffsverletzung) zur Folge.

Beispiel: Ein `delete` mit einem Rückgabewert von `get` wird vom Compiler akzeptiert, führt aber zu einem Laufzeitfehler:

```
shared_ptr<C> sp(std::make_shared<C>());
unique_ptr<C> up(std::make_unique<C>());
delete up.get(); // Laufzeitfehler
delete sp.get(); // Laufzeitfehler
```

Eine Zuweisung an `get` ist nicht möglich:

```
up.get() = nullptr; // Fehler: get() ist kein L-Wert
```

Wenn man prüfen will, ob ein smart pointer leer ist, ist das auch mit einer Prüfung des Objekts möglich. Die vordefinierte Konversion

*explicit operator **bool**() const noexcept;*

gibt den Wert von

```
get() != nullptr
```

zurück, d.h. *true*, wenn der enthaltene Zeiger kein Nullzeiger ist, und sonst *false*.

Beispiel: Die Abfrage

```
if (up.get() != nullptr)
```

kann man vereinfachen zu

```
if (up)
```

Mit *reset* kann man den Zeiger in einem smart pointer auf den Wert *nullptr* oder auf einen anderen Wert setzen. Dabei wird der Destruktor des zurückgesetzten Objekts aufgerufen:

```
void reset() noexcept;
template<class T> void reset(T* ptr);
```

Beispiel: Durch die Anweisungen

```
shared_ptr<C> sp(std::make_shared<C>()); // C* sp = new C();
unique_ptr<C> up(std::make_unique<C>()); // C* up = new C();
cout << "vor reset(): " << sp.get() << " : " << up.get() << endl;

up.reset();
sp.reset();
cout << "nach reset(): " << sp.get() << " : " << up.get() << endl;
```

erhält man eine Ausgabe wie

```
vor reset(): 0057E140 : 0057E1D0
nach reset(): 00000000 : 00000000
```

An *reset* kann man auch einen Zeiger übergeben, aber keinen smart pointer:

```
C* c1 = new C();
up.reset(c1);
sp.reset(c1);

up.reset(std::make_unique<C>()); // wird nicht kompiliert
sp.reset(std::make_shared<C>()); // wird nicht kompiliert
```

Übergibt man an *reset* den Rückgabewert *get()* eines smart pointers wird das kompiliert, hat aber einen Laufzeitfehler zur Folge.

## 18.2 *unique\_ptr*

Die Probleme, die infolge einer Zuweisung von Zeigern auftreten können, vermeidet man am einfachsten dadurch, dass man solche Zuweisungen unterbindet. Das ist mit einem *unique\_ptr* gewährleistet, da für ein Objekt dieser Klasse weder eine Kopie (der Aufruf des Kopierkonstruktors) noch eine Zuweisung möglich ist:

```
template <class T, class D = default_delete<T>>
class unique_ptr // unique_ptr hat weitere Elemente - hier nur
{               // die, die Kopien und Zuweisungen unterbinden
    unique_ptr(const unique_ptr&) = delete;
    unique_ptr& operator=(const unique_ptr&) = delete;
};
```

Beispiel: Mit einem *unique\_ptr*-Objekt

```
unique_ptr<T> up(std::make_unique<T>()); // T: ein Datentyp
```

sind keine Kopien und Zuweisungen möglich:

```
unique_ptr<T> up1 = up; // Fehler: Kein Zugriff auf den
                        // Kopierkonstruktor
up1 = up; // Fehler: Kein Zugriff auf operator=
```

Deshalb kann nur ein einziger *unique\_ptr* auf einen Speicherbereich zeigen, der von einem *unique\_ptr* verwaltet wird. Dieser *unique\_ptr* ist dann alleine für diesen Speicherbereich und insbesondere seine Freigabe (meist mit *delete*) verantwortlich.

Da ein Wertparameter mit dem Kopierkonstruktor übergeben wird, kann ein *unique\_ptr* nur als Referenzparameter an eine Funktion übergeben werden. Wie aber schon in Abschnitt 18.1 bemerkt wurde, sollte man normalerweise keinen smart pointer als Parameter übergeben.

Beispiel: Die Funktion

```
void UP_WParameter(std::unique_ptr<int> up)
{
    int x=*up;
}
```

kann nicht mit einem *unique\_ptr*-Argument (wie z.B. *up* aus dem letzten Beispiel) aufgerufen werden. Mit einem Referenzparameter geht das aber:

```
void UP_RParameter(std::unique_ptr<int>& up)
void UP_CRParameter(const std::unique_ptr<int>& up)
```

Es ist aber möglich, Objekte in einen *unique\_ptr* mit *std::move* (**move-Semantik**) zu verschieben. Durch *std::move* kann ein konstanter Wert oder eine Variable in einen Container verschoben werden. Die ursprüngliche Variable wird dann dadurch ein leerer *unique\_ptr*. Bei einem leeren *unique\_ptr* ist der Aufruf des Destruktors eine leere Operation.



Beispiel: Beim Verlassen des Blocks

```
{
    unique_ptr<C> up(std::make_unique<C>());
    unique_ptr<C> up2(std::move(up)); // das geht
    up2 = std::move(up); // derselbe Effekt wie letzte Zeile
}
```

wird nur ein Destruktor aufgerufen, da *up* durch *std::move* zu einem leeren *unique\_ptr* wird, bei dem der Aufruf des Destruktors eine leere Operation ist.

Durch *std::move* wird das Argument von *std::move* verändert. Die Anweisungen

```
unique_ptr<C> p1 = std::make_unique<C>();
unique_ptr<C> p2;
cout << "vor move: p1.get()=" << p1.get() << " p2.get()="
      << p2.get() << endl;

p2 = std::move(p1);
cout << "nach move: p1.get()=" << p1.get() << " p2.get()="
      << p2.get() << endl;
```

erzeugen eine Ausgabe wie

```
vor move: p1.get()=0042C120 p2.get()=00000000
nach move: p1.get()=00000000 p2.get()=0042C120
```

Die Rückgabe eines *unique\_ptr* aus einer Funktion ist möglich, da der Rückgabewert einer Funktion ein R-Wert ist und deshalb die move-Semantik zum Tragen kommt.

Beispiel: Durch den Aufruf der Funktion

```
std::unique_ptr<C> create()
{
    std::unique_ptr<C> local_ptr = std::make_unique<C>();
    return local_ptr; // local_ptr wird mit
                    // move-Semantik zurückgegeben
}
```

in

```
unique_ptr<C> p = create();
```

wird der lokale *unique\_ptr* zu *p* verschoben.

## 18.3 shared\_ptr

Die Ausführungen der letzten beiden Abschnitte haben gezeigt, dass man mit *unique\_ptr* schon recht weit kommt. Es wird oft empfohlen, *unique\_ptr* zu bevorzugen, falls sie ausreichend sind. Dazu Stroustrup „... shared ownership isn't my ideal: It is better if an object

has a definite owner and a definite, predictable lifespan.” Das gilt vor allem für Zeiger, die **in einem Block** definiert werden.

Nimmt man einen *unique\_ptr* in eine Klasse auf, kann man allerdings auch keine Variablen des Klassentyps kopieren. Deshalb sind für **Klassenelemente** oft smart pointer des Typs *shared\_ptr* notwendig.

Ein *shared\_ptr* unterscheidet sich von einem *unique\_ptr* vor allem dadurch, dass man ihn kopieren kann. Deshalb können mehrere *shared\_ptr* auf denselben Speicherbereich zeigen. Dieser Speicherbereich darf erst dann mit *delete* freigegeben werden, wenn das letzte *shared\_ptr*-Objekt seinen Gültigkeitsbereich verlässt. Das wird mit einem Referenzzähler erreicht, der im Konstruktor auf 1 gesetzt wird. Bei jeder Zuweisung oder Kopie wird er um 1 hochgezählt und bei jedem Destruktoraufruf um 1 reduziert. Erst dann, wenn dieser Referenzzähler den Wert 0 erreicht, wird der Speicherbereich mit *delete* wieder freigegeben.

Da ein Destruktor die Destrukturen aller Datenelemente der Klasse aufruft (siehe Abschnitt 8.1.5, 6.), wird auch der Destruktor eines smart pointer Datenelements aufgerufen. Deshalb muss man für eine Klasse, die nur smart pointer und keine gewöhnlichen Zeiger hat, keinen Destruktor definieren, und außerdem auch keinen Zuweisungsoperator und Kopierkonstruktor (Dreierregel).

Beispiel: Wenn eine Klasse einen Zeiger auf einen dynamischen Speicherbereich enthält, muss man in der Klasse einen Destruktor definieren, der diesen Speicher wieder freigibt:

```
class C
{
    int* p;
public:
    C(int x): p(new int(x)) { }
    ~C() // der Destruktor ist notwendig, da die Klasse einen
        { delete p; } // Zeiger enthält
};
```

Außerdem ist ein Kopierkonstruktor und Zuweisungsoperator notwendig (Dreierregel). Enthält die Klasse anstelle eines Zeigers dagegen einen smart pointer, muss kein Destruktor definiert werden, da ein smart pointer eine Klasse mit einem Destruktor ist, der den Speicherbereich frei gibt:

```
class D
{
    std::shared_ptr<int> u = std::make_shared<int>();
public:
    D(int x): u(std::make_shared<int>(x)) { }
}; // kein Destruktor notwendig
```

Den Referenzzähler kann man mit der Elementfunktion *use\_count()* abfragen. Dazu besteht allerdings außer für Testzwecke nur selten Veranlassung.

Beispiel: Mit der Klasse C aus Abschnitt 18.1 erhält man bei der Ausführung des Blocks

```

{
    shared_ptr<C> s1 = make_shared<C>();
    cout << "s1.uc=" << s1.use_count() << endl;
    {
        shared_ptr<C> s2 = s1;
        cout << "s1.uc=" << s1.use_count() << " s2.uc=" <<
            s2.use_count() << endl;
        {
            shared_ptr<C> s3 = s1;
            cout << "s1.uc=" << s1.use_count() << " s2.uc=" <<
                s2.use_count()
                << " s3.uc=" << s3.use_count() << endl;
        }
        cout << "s1.uc=" << s1.use_count() << " s2.uc=" <<
            s2.use_count() << endl;
    }
    cout << "s1.uc=" << s1.use_count() << endl;
} // Aufruf des Destruktors von s1

```

diese Meldungen:

```

s1.uc=1
s1.uc=2 s2.uc=2
s1.uc=3 s2.uc=3 s3.uc=3
s1.uc=2 s2.uc=2
s1.uc=1
Destruktor C

```

Hier sieht man, dass der Referenzzähler auch dann erhöht wird, wenn ein *shared\_ptr* auf der rechten Seite steht, und dass der Destruktor erst dann aufgerufen wird, wenn der Referenzzähler den Wert 0 erhält.

Mit einer von einer Klasse C abgeleiteten Klasse E kann auch ein *shared\_ptr<E>* einem *shared\_ptr<C>* zugewiesen werden. Wenn dann in E eine **virtuelle Funktion** von C überschrieben wird, führt der Aufruf der virtuellen Funktion zum Aufruf der Funktion, die zum dynamischen Datentyp gehört.

Beispiel: Mit den Klassen (analog zu den Klassen C und E von Abschnitt 8.4.3)

```

class C
{
public:
    C() { cout << "C::C" << endl; }
    virtual void f() { cout << "C::f" << endl; }
    virtual ~C() { cout << "C::~C" << endl; }
};

```

```

class E :public C
{
public:
    E() { cout << "E::E" << endl; }
    void f() override { cout << "E::f" << endl; }
    ~E() { cout << "E::~E" << endl; }
};

```

sind mit

```

std::shared_ptr<C> c(std::make_shared<C>()); // C::C
std::shared_ptr<E> e(std::make_shared<E>()); // C::C, E::E

```

die folgenden Anweisungen möglich und haben die als Kommentar angegebene Ausgabe:

```

c->f(); // C::f
c = e; // C::~C
c->f(); // E::f

```

### Aufgabe 18.3

1. Fügen Sie in einen *vector* mit smart pointer Elementen Werte ein:

- in einen *vector* mit Elementen des Typs *unique\_ptr<int>*
- in einen *vector* mit Elementen des Typs *shared\_ptr<int>*
- Können die Vektoren unter a) und b) mit *std::sort* nach den *int*-Werten sortiert werden?

2. Die Klasse

```

class C_alt {
    int* p;
public:
    C_alt(int n) :p(new int(n)) {}
    C_alt(const C_alt& x)
    {
        // hier sollen alle Anweisungen für eine tiefe Kopie stehen
    }
    C_alt& operator=(const C_alt& x)
    {
        // hier sollen alle Anweisungen für eine tiefe Kopie stehen
    }
    ~C_alt() { delete p; }
};

```

die für einen älteren Compiler geschrieben wurde, der noch keine smart pointer kennt, soll auf smart pointer überarbeitet werden:

- a) mit *shared\_ptr*
  - b) mit *unique\_ptr*
  - c) unterscheiden sich die Einsatzmöglichkeiten von a) und b)?
3. In der Klasse C soll beim Aufruf von *init* eine Exception auftreten können. Damit in diesem Fall kein Speicherleck auftritt, wurde für einen älteren Compiler, der noch keine smart pointer kennt, diese Variante mit *try-catch* gewählt.

```

struct A { /* ... */ };
struct B { /* ... */ };

class C { // inhaltlich sinnlos
    A *a;
    B *b;
    void init() noexcept(false);
public:
    C()
    {
        try {
            a = new A();
            b = new B();
            init();
        }
        catch (...)
        {
            delete a;
            delete b;
            a = nullptr;
            b = nullptr;
            throw;
        }
    }
};

```

- a) Überarbeiten Sie C zu einer Klasse *C\_neu* mit smart pointern, so dass kein *try-catch* mehr notwendig ist und bei einer Exception in *init* trotzdem kein Speicherleck mehr auftritt.
  - b) Würden Sie sich für einen *shared\_ptr* oder einen *unique\_ptr* entscheiden?
  - c) Welche Funktionen fehlen in der Klasse C?
  - d) Fehlen diese Funktionen aus b) auch in *C\_neu*.
4. Beschreiben Sie, was beim Aufruf der folgenden Funktionen passiert:

- a) `void Aufgabe_4a()`

```

{
    C1* p1 = new C1();
    shared_ptr<C1> s1(p1);
    shared_ptr<C1> s2(p1);
};

```

```
b) void Aufgabe_4b()
{
    shared_ptr<C1> s1(new C1());
    shared_ptr<C1> s2(s1.get());
}
```

```
c) void Aufgabe_4c()
{
    int* p = new int(17);
    {
        shared_ptr<int> s1(p);
    }
    cout << *p << endl;
}
```

5. Welche Werte werden beim Aufruf der Funktion Z\_1 ausgegeben?

```
struct Node1
{
    shared_ptr<Node1> next;
};

void Z_1()
{
    shared_ptr<Node1> first=make_shared<Node1>();
    first->next = make_shared<Node1>();
    cout << "first.uc=" << first.use_count() << " first->next.uc=" <<
        first->next.use_count() << endl;
    first->next = first;
    cout << "first.uc=" << first.use_count() << " first->next.uc=" <<
        first->next.use_count() << endl;
}
```

6. Geben Sie die Werte von uc1 bis uc6 bei der Ausführung dieser Anweisungen an:

```
std::shared_ptr<int> s1=std::make_shared<int>(3);
int uc1 = s1.use_count();
std::shared_ptr<int> s2 = s1;
int uc2 = s1.use_count();
SP_WParameter(s1,s1);
int uc3 = s1.use_count();
```

Dabei soll diese Funktion aufgerufen werden:

```
void SP_WParameter(std::shared_ptr<int> sp, std::shared_ptr<int>&
out )
{
    sp.get();
    int uc4 = sp.use_count();
    int uc5 = out.use_count();
    std::shared_ptr<int> sp1 = sp;
```

```
    int uc6 = out.use_count();
}
```

## 18.4 Deleter und smart pointer für Arrays

Mit der bisher verwendeten Syntax wird der von einem smart pointer verwaltete Speicherbereich mit *delete* freigegeben. Deshalb kann ein so erzeugter smart pointer nicht mit einem dynamisch erzeugten Array verwendet werden, da ein solches Array mit *delete[]* freigegeben werden muss.

Für dynamische erzeugte Arrays muss eine **Array-Variante** verwendet werden. Für die wichtigsten dieser Array-Varianten kann der smart pointer auch den Index-Operator verwenden. Für ältere Varianten steht dieser nicht immer zur Verfügung. Ein *make\_shared* oder *make\_unique* gibt es für die Array-Varianten nicht.

Die universellste und einfachste dieser **Array-Varianten** ist die mit dem Typ-Argument „T[]“, mit der man ein Array mit Elementen des Typs T anlegen kann. Diese steht für *unique\_ptr* schon länger und für *shared\_ptr* seit C++17 zur Verfügung. Ihre Syntax wird nur an einem Beispiel gezeigt, das sich aber leicht auf andere Datentypen übertragen lässt.

Beispiel: Die ausführliche Schreibweise (mit der Klasse C vom Anfang von Abschnitt 18.1)

```
std::shared_ptr<C[]> s = std::shared_ptr<C[]>(new C[2]); //
                                     C++17 array form
std::unique_ptr<C[]> u = std::unique_ptr<C[]>(new C[3]); //
                                     unique_ptr gleiche Syntax
```

ist gleichwertig zu der vereinfachten Schreibweise:

```
std::shared_ptr<C[]> s{ new C[2] }; // C++17 array form
std::unique_ptr<C[]> u{ new C[3] }; // unique_ptr gleiche
                                     Syntax
```

Ruft man diese beiden Anweisungen in einem Block auf, wird der Destruktor von C beim Verlassen des Blocks 5 Mal aufgerufen. Auf die Elemente der beiden Arrays kann man mit dem Indexoperator zugreifen:

Den so erhaltenen smart pointern entspricht das dynamische Array a, für dessen Elemente aber beim Verlassen eines Blocks keine Destruktoren aufgerufen werden:

```
C* a = new C[3];
```

Mit *reset* kann man die Größe des Arrays zur Laufzeit verändern. Dann wird für jedes Element des ursprünglichen Arrays der Destruktor aufgerufen.

Beispiel: Die Größe eines Arrays kann man mit Anweisungen wie den folgenden verändern:

```

{
    using std::shared_ptr; using std::unique_ptr;
    shared_ptr<C[]> s = shared_ptr<C[]>(new C[2]);
    unique_ptr<C[]> u = unique_ptr<C[]>(new C[3]);
    s.reset(new C[4]); // 2 Aufrufe Destruktors von C
    u.reset(new C[5]); // 3 Aufrufe Destruktors von C
} // 9 Aufrufe Destruktors von C

```

Die restlichen Ausführungen dieses Abschnitts zeigen ältere Array-Varianten und einige sehr spezielle Anwendungen.

In C++14 gab es schon eine Array-Variante mit `default_delete<T[]>`, für die aber der Index-Operator nicht verfügbar ist:

```

shared_ptr<C> a(new C[10], std::default_delete<C[]>()); // C++14
                                                    array form

```

Mit einem sogenannten **Deleter** können beliebige Anweisungen festgelegt werden, die im Destruktor des smart pointers ausgeführt werden. Ein solcher Deleter ist eine Funktion, ein Funktionsobjekt oder ein Lambda-Ausdruck, der für das Typ-Argument T einen Parameter des Typs T\* hat.

Beispiel: Mit einem Deleter wie

```

template<typename T>
void MeinArrayDeleter(const T* p) // ein Funktions-Template
{
    cout << "MeinArrayDeleter" << endl;
    delete[] p; // delete für ein dynamisch erzeugtes Array
};

```

kann man ein dynamisch erzeugtes Array wie mit den Array-Varianten von `unique_ptr` oder `shared_ptr` mit `delete[]` freigeben:

```

unique_ptr<C, std::function<void(C*)>> ud(new C[4],
                                           MeinArrayDeleter<C>);
shared_ptr<C> sd(new C[3], MeinArrayDeleter<C>);

```

Mit einem Deleter kann man RAII auch für Datentypen implementieren, ohne diese in eine selbst geschriebene Klasse zu kapseln, in deren Destruktor die Ressource dann wieder frei gegeben wird.

Beispiel: Für einen *FILE*-Pointer aus C kann man mit der nächsten Definition sicherstellen, dass `fclose` nicht vergessen wird:

```

std::unique_ptr<std::FILE, decltype(&std::fclose)>
    fp(std::fopen("demo.txt", "r"), &std::fclose);
if (fp) // Nur falls fopen erfolgreich war
    int c = std::fgetc(fp.get()); // lese ein Zeichen

```



```

// shared_ptr geht auch, obwohl man FILE* Zeiger vermutlich
// nie kopieren wird
std::shared_ptr<std::FILE> fps(std::fopen("demo.txt", "r"),
                               &std::fclose);
if (fps) // Nur falls fopen erfolgreich war
    int c = std::fgetc(fp.get()); // lese ein Zeichen

```

## 18.5 weak\_ptr Θ

Ein *weak\_ptr* speichert einen Verweis auf ein Objekt, das bereits über einen *shared\_ptr* verwaltet wird. Diese eingeschränkte Verwendung wird dadurch erreicht, dass ein *weak\_ptr* nur mit einem *shared\_ptr* oder mit einem *weak\_ptr* initialisiert werden kann, bzw. einem *weak\_ptr* nur ein solches Objekt zugewiesen werden kann. Außerdem kann ein *weak\_ptr* mit seinem Standardkonstruktor erzeugt werden. Er enthält dann vor einer entsprechenden Zuweisung keinen Verweis. Andere Möglichkeiten zur Konstruktion bzw. zur Zuweisung an einen *weak\_ptr* gibt es nicht.

Die Klasse *weak\_ptr* dient im Wesentlichen nur dazu, *shared\_ptr* zu beobachten, ohne diese und ihre Referenzzähler verändern zu können. Ein *weak\_ptr* ist tatsächlich auch kein smart pointer, da er selbst überhaupt keine Ressourcen verwaltet, kein RAII implementiert und insbesondere keine Ressourcen freigibt.

- Anstelle eines *weak\_ptr* kann man oft auch einen gewöhnlichen Zeiger verwenden.
- Würde man einen Verweis auf einen *shared\_ptr* über einen anderen *shared\_ptr* implementieren, würde die Initialisierung oder Zuweisung zur Erhöhung des Referenzzählers führen, und diese würde sich auf den Aufruf des Destruktors auswirken.

Beispiel: Ein *weak\_ptr* kann nur mit einem *shared\_ptr* oder mit einem *weak\_ptr* initialisiert werden:

```

shared_ptr<C> s = make_shared<C>();
std::weak_ptr<C> w1(s);
std::weak_ptr<C> w2(w1);

```

aber nicht mit einem *unique\_ptr*:

```

unique_ptr<int> pu = make_unique<int>(1);
std::weak_ptr<int> p(pu); // Fehler

```

Ein mit dem Standardkonstruktor erzeugter *weak\_ptr* enthält keinen Verweis:

```

std::weak_ptr<C> we;

```

Führt man diese Anweisungen in einem Block aus, werden beim Verlassen des Blocks die Destruktoren von *s*, *w1* und *w2* aufgerufen. Aber nur der Aufruf des Destruktors von *s* führt zum Aufruf des Destruktors von *C*.

Ein *weak\_ptr* hat wie ein *shared\_ptr* die Elementfunktion

```
long use_count() const noexcept;
```

Diese gibt wie ein `shared_ptr` die Anzahl der `shared_ptr` Instanzen zurück, die gemeinsam für ein verwaltetes Objekt verantwortlich sind. Falls die aktuelle Instanz leer ist, hat `use_count` den Wert 0. Genau dann ist auch der Rückgabewert der Elementfunktion

```
bool expired() const noexcept;
```

`false`. An ihrem Wert `true` erkennt man also, ob das verwaltete Objekt noch existiert. Falls der `use_count` den Wert 0 erreicht, wird kein Destruktor aufgerufen.

Beispiel: Nach den Anweisungen des letzten Beispiels hat `use_count` diese Werte:

```
// s.use_count()==1 w1.use_count()==1 w2.use_count()==1
                        we.use_count()==0
```

Hätte man im letzten Beispiel die `weak_ptr` durch `shared_ptr` ersetzt, wäre der `use_count` von `s`, `w1` und `w2` jeweils 3.

Führt man im letzten Beispiel außerdem noch die Zuweisung

```
shared_ptr<C> s2 = s;
```

aus, hat `use_count` von `s`, `w1` und `w2` jeweils den Wert 2.

Im nächsten Block hat `we.expired` den Wert `false` und nach dem Verlassen des Blocks den Wert `true`.

```
std::weak_ptr<C> we;
{
    shared_ptr<C> sp = make_shared<C>();
    we = sp;
    cout << we.use_count() << " " << we.expired() << endl;
} // 1 false
cout << we.use_count() << " " << we.expired() << endl; // 0 true
```

Ein `weak_ptr` hat im Vergleich mit einem `shared_ptr` nur wenige Operationen. Insbesondere gibt es keine `get`-Funktion oder keinen `*`-Operator, mit dem man auf das Objekt zugreifen kann, auf das der Zeiger zeigt. Man kann nur mit der Funktion

```
std::shared_ptr<T> lock() const noexcept;
```

den verwiesenen `shared_ptr` lesen, und über den dann den Wert.

`weak_ptr` werden vor allem zur Vermeidung von **zyklischen Abhängigkeiten** zwischen `shared` pointern benötigt. Ein solcher Zyklus entsteht dann, wenn zwei oder mehr `shared_ptr` Verweise aufeinander enthalten. Dann kann der erste nicht freigegeben werden, weil er einen Verweis auf den zweiten enthält, und der zweite nicht, weil er einen Verweis auf den ersten enthält. Diese Situation kann mit einem Deadlock beim Multithreading verglichen werden.

Beispiel: Mit

```
struct Node1
{
    shared_ptr<Node1> next;
};
```

entsteht in der Funktion *Zyklen\_1* eine zyklische Abhängigkeit: Durch diesen Zyklus ist der *use\_count* in beiden Knoten auch beim Verlassen der Funktion 2. Deshalb kann der Destruktor diese beiden Knoten nicht freigeben, obwohl von außerhalb der Funktion kein Zugriff mehr auf diese Knoten möglich ist. Das hat ein memory leak zur Folge:

```
void Zyklen_1()
{
    shared_ptr<Node1> first=make_shared<Node1>();
    first->next = make_shared<Node1>();
    // first.use_count() = 1 first->next.use_count() = 1
    first->next = first;
    // first.use_count() = 2 first->next.use_count() = 2
} // memory leak
```

Eine zyklische Abhängigkeit wie in *Zyklen\_1* kann vermieden werden, wenn man eine Verweisrichtung durch einen *weak\_ptr* implementiert.

Beispiel: Ersetzt man *Node1* aus dem letzten Beispiel durch *Node2*

```
struct Node2
{
    shared_ptr<Node2> next;
    weak_ptr<Node2> w_next;
};
```

und den zyklischen Verweis der *shared\_ptr*

```
first->next = first;
```

durch einen Verweis auf den *weak\_ptr*

```
first->w_next = first;
```

gibt es keinen zyklischen Verweis mehr:

```
void Zyklen_2()
{
    shared_ptr<Node2> first = make_shared<Node2>();
    first->next = make_shared<Node2>();
    // first.use_count() = 1 first->next.use_count() = 1
    first->w_next = first; // Zyklus
    // first.use_count()=1 first->next.use_count()=1
} // kein memory leak
```

Da der *use\_count* 1 ist, wird beim Aufruf der Destruktoren von *first* und *first->next* für die Zeiger *delete* aufgerufen. Deshalb gibt es auch kein memory leak.

# Literaturverzeichnis

## C++ Guidelines:

C++ Core Guidelines: <http://isocpp.github.io/CppCoreGuidelines>

Eine Liste von weiteren C++ GuideLines:

<https://github.com/isocpp/CppCoreGuidelines/blob/master/CppCoreGuidelines.md>

## C++ Online Referenzen:

<https://en.cppreference.com/>: Eine online-Referenz, die den Standard weitgehend abdeckt.

## Microsoft Referenzen:

<https://docs.microsoft.com/en-us/cpp/standard-library/stl-containers?view=vs-2019>

<https://docs.microsoft.com/en-us/cpp/cpp/cpp-language-reference?view=vs-2019>

## C++ Standards:

C++98: International Standard ISO/IEC 14882:1998

C++03: International Standard ISO/IEC 14882:2003

C++11: International Standard ISO/IEC 14882:2011 (C++11 draft [n3337.pdf](#))

C++14: International Standard ISO/IEC 14882:2014 (C++14 draft [n4140.pdf](#))

C++17: International Standard ISO/IEC 14882:2017 (C++17 draft [n4659.pdf](#))

C++20: International Standard ISO/IEC 14882:2020 (C++20 draft [n4860.pdf](#))

Published by American National Standards Institute, 11 West 42<sup>nd</sup> Street, New York, New York 10003, [www.ansi.org](http://www.ansi.org)

Unter den Links [n4860.pdf](#) usw. findet man auf <http://www.open-std.org/jtc1/sc22/wg21/> frei verfügbare Entwürfe (drafts) der Standards. Diese sind weitgehend identisch mit den Standards.

Coplien, James O.: *Advanced C++ Programming Styles and Idioms*

Addison Wesley, Reading, Mass. 1991

Cormen, Thomas H., C. E. Leiserson, R. L. Rivest, C. Stein: *Introduction to Algorithms*

MIT Press, 2001

Coverity Scan Report: <https://news.synopsys.com/2014-04-15-Coverity-Scan-Report-Finds-Open-Source-Software-Quality-Outpaces-Proprietary-Code-for-the-First-Time>

Dijkstra, Edsger W.: *A Discipline of Programming*

Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J. 1976

Gottschling, Peter: *Discovering Modern C++*

2020

- Josuttis, Nicolai: *The C++ Standard Library 2<sup>nd</sup> Edition*  
Addison-Wesley, 2012
- Josuttis, Nicolai: *C++ 17 – The Complete Guide*  
<http://leanpub.com/cpp17>, 2019
- Kaiser, Richard: *C++ mit Microsoft Visual C++ 2008*  
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 2009
- Kaner, Cem; Jack, Falk, Hung Quoc Nguyen: *Testing Computer Software*  
John Wiley, New York, 1999
- Kernighan, Brian; Ritchie, Dennis: *The C Programming Language*  
2<sup>nd</sup> ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J. 1988
- Knuth, Donald: *The Art of Computer Programming*  
Vol. 1, Fundamental Algorithms, Addison-Wesley, Reading, Mass. 1973
- Liggesmeyer, Peter: *Software-Qualität*  
Spektrum, Akad.-Verlag, Heidelberg Berlin 2002
- Meyers, Scott: *Effective C++*  
Addison Wesley, Reading, Mass. 1998
- Meyers, Scott: *Effective STL*  
Addison Wesley, Reading, Mass. 2001
- Meyers, Scott: *More Effective C++*  
Addison Wesley, Reading, Mass. 1996
- Park, Stephen K.; K. W. Miller: *Random Number Generators: Good ones are hard to find*  
Communications of the ACM, Vol. 31, Number 10, May 1988, pp. 1192–1201.
- Stroustrup, Bjarne: *The C++ Programming Language*  
2<sup>nd</sup> ed., Addison-Wesley, Reading, Mass. 1991  
3<sup>rd</sup> ed., Addison-Wesley, Reading, Mass. 1997  
4<sup>th</sup> ed., Addison-Wesley, Reading, Mass. 2013
- Sutter, Herb: *Exceptional C++*  
Addison-Wesley, 2000
- Sutter, Herb: *Exceptional C++ Style*  
Addison-Wesley, 2005
- Veldhuizen: *Techniques for Scientific C++*  
Indiana University Computer Science Technical Report # 542 Version 0.4, August 2000  
<https://www.cs.indiana.edu/pub/techreports/TR542.pdf>

# Index

|                                                            |                                                 |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| -- 57                                                      | /                                               |
| !                                                          | /* 167                                          |
| ! <i>Siehe not</i> , logisches                             | // 167                                          |
| != 63                                                      | [                                               |
| #                                                          | [[Attribut]] <i>Siehe</i> Attribut              |
| $\pi$ <i>Siehe</i> Pi, <i>Siehe</i> Pi                     | [[ <i>deprecated</i> ]] <i>Siehe</i> Attribut   |
| #define 179                                                | [[ <i>fallthrough</i> ]] <i>Siehe</i> Attribut  |
| #elif 182                                                  | [[ <i>maybe_unused</i> ]] <i>Siehe</i> Attribut |
| #else 182                                                  | [[ <i>nodiscard</i> ]] <i>Siehe</i> Attribut    |
| #endif 182                                                 | ^                                               |
| #if 182                                                    | ^ <i>Siehe xor</i> , bitweises                  |
| #ifdef 185                                                 | —                                               |
| #ifndef 185                                                | __cplusplus 185                                 |
| include-guard 186                                          | __cpp_xxx <i>Siehe</i> Makro                    |
| #include 84, 178                                           | __DATE__ 181                                    |
| #pragma 186                                                | __FILE__ 181                                    |
| once 186                                                   | __FUNCSIG__ 182                                 |
| region 187                                                 | __FUNCTION__ 182                                |
| #undef 180                                                 | __has_cpp_attribute <i>Siehe</i> Makro          |
| &                                                          | __has_xxx <i>Siehe</i> Makro                    |
| & <i>Siehe and</i> , bitweise, <i>Siehe</i> Adressoperator | __LINE__ 181                                    |
| & (Referenztyp) 351                                        | __TIME__ 181                                    |
| && <i>Siehe and</i> , logisches                            | __try__except 561                               |
| *                                                          | __CRT_SECURE_NO_WARNINGS                        |
| * (Dereferenzierungsoperator) 280                          | Fehlermeldung 187                               |
|                                                            | __MSC_FULL_VER 184                              |
|                                                            | __MSC_VER 184                                   |

- |
- | *Siehe or*, bitweises
- || *Siehe or*, logisches
- ~
- ~ *Siehe not*, bitweises
- +
- ++ 57
- <
- < 63
- << 344
- <= 63
- <=> *Siehe* Operatorfunktion <=>
- =
- == 63
- >
- > 63
- >= 63
- >> 344
- 3
- 3n+1-Problem 82
- A**
- Ablaufprotokoll 148
  - für Zeiger 289
  - Horner-Schema 252
  - symbolisches 152
- Ableitung von Klassen *Siehe* Vererbung
- abs* 330
- abstrakte Basisklasse *Siehe* Basisklasse
- abstrakte Klasse *Siehe* Klasse
- abstrakter Typ 523
- accumulate* *Siehe* STL-Algorithmus
- Ackermann-Funktion 103
- adjacent\_find* *Siehe* STL-Algorithmus
- Adresse 37
- Adressoperator & 283
- Algorithmen der STL *Siehe* STL-Algorithmus
- Alias für einen Datentyp *Siehe* using-Deklaration
- Aliasing *Siehe* Zeiger
- all\_of* *Siehe* STL-Algorithmus
- Allokator *pmr* *Siehe* Container
- Analysieren *Siehe* C++ Core Guidelines
- and*
  - & bitweise 57
  - logisches 64
- anonyme Funktion 690
- ANSI-Zeichensatz 60
- any\_of* *Siehe* STL-Algorithmus
- Arcusfunktionen 122
- AreEqual *Siehe* Unittests
- Argument 77
  - Default- 88, *Siehe* Default-Argument
- arithmetische Konversion *Siehe* Konversion
- arithmetische Operatoren
  - für Ganzzahldatentypen 54
  - für Gleitkommatentypen 117
- arithmetischer Datentyp 111
- Array 243
  - Adresse Element 247
  - als Parameter übergeben 257
  - C-Array 245
  - Container 259
  - dynamisch erzeugtes 243, 292, 298
  - fixed size 248
  - gewöhnliches 243
  - Initialisierung 253
  - mehrdimensionales 262
  - mit *char*-Elementen 254
  - mit Elementen eines Klassentyps 380
  - mit range-checks 747
  - ohne Elementanzahl 254
  - Speicherbereich 247
  - std array* 248
  - Vergleich mit Liste 319
- Arraygrenze
  - mit *enum* 275
- ASCII-Zeichensatz 59
- asm* 110
- Assembler-Anweisung 110
- assert* 575
- Assert *Siehe* Unittests
  - AreEqual* 146
- assoziative Container 620
  - Iteratoren 623
  - map 621
  - multimap* 621
  - multiset* 620



- set* 620
- unordered *set*, *map* usw. 626
- Assoziativgesetz 114
- async* *Siehe* Multithreading, *Siehe* Multithreading
- at* 593
- atomare Datentypen *Siehe* Multithreading
- Attribut 188
  - deprecated 188
  - fallthrough* 189
  - maybe\_unused 190
  - nodiscard 189
- Aufgabe
  - Klasse *Bruch* 343, 421
  - Klasse *Kreis* 387
  - Klasse *Quadrat* 387
  - Klasse *Rechteck* 387
- Aufgabenliste 29
- Aufrufhierarchie anzeigen *Siehe* Editor
- Aufrufliste *Siehe* Debugger
- Aufrufoperator () *Siehe* operator
- Aufzählungstyp *Siehe* *enum*
- Ausdruck
  - Reihenfolge der Auswertung 358
- ausführbares Programm 25
- Ausführungszeit 611
- Ausgabeoperator << 659
- Ausnahme *Siehe* Exception-Handling
- Ausnahmebehandlung *Siehe* Exception-Handling
- auto* 49, 400
  - in C 404
  - mit Initialisierungslisten 401
- auto[...]* *Siehe* strukturierte Bindung
- auto\_ptr* 904

## B

- bad\_alloc* 291
- basic\_string* 202, 729
- Basisklasse 462, 516
  - abstrakte 521
  - als Teilobjekt 463
  - direkte 462
  - indirekte 462
  - private* 464
  - protected* 464
  - public* 464
  - virtuelle 486
- Baum
  - balancierter 324
  - binärer Suchbaum 322
  - iterativ einfügen 323
  - rekursiv durchlaufen 324
  - rekursiv durchsuchen 325
  - rekursiv einfügen 324
- bedingte Kompilation 182
- Bedingungsüberdeckung *Siehe* Test
- Bedingungsvariable *Siehe* Multithreading
- Befehlsfenster 133
- begin* Iterator 596
- Benchmarks 121
- Benchmarktimer 696
  - mit fold-Ausdrücken 763
  - mit Lambda-Ausdrücken 696
- benutzerdefinierte Konversion *Siehe* Konversion
- Bereich, Iteratoren 597
  - zulässiger Bereich 597
- bereichsbasierte *for*-Schleife 601
- Bezeichner 35
- Beziehungen zwischen Variablen 155
- Bibliothek 84
- BidirectionalIterator 775
- Binärbaum 620
- binäre Ziffern einer Zahl 213
- binäres Suchen 260, 807
- Binärliteral *Siehe* Literal
- Binärmodus (stream) 649, 653
- Binärsystem 43
- binary\_search* *Siehe* STL-Algorithmus
- BinaryPredicate* 682
- bind* *Siehe* Binder
- Binder 686, 687
  - placeholder* 688
  - Platzhalter 688
  - std::bind* 455, 688
  - std::mem\_fn* 456
- Bindung
  - frühe 376, 494, 497, 502
  - späte 376, 488, 494
- Binomialkoeffizient 102, 265
- bitset* 734
- Block 69
- bool* 41, 63
- boolesche Konversionen 65
- Boost-Bibliothek
  - noncopyable* 743
- branch coverage *Siehe* Test, Zweigüberdeckung
- break*-Anweisung 105, 109
- Breakpoint *Siehe* Debugger

Bruchrechnung 343

## C

*c\_str* *Siehe* *string*

C++ Core Guidelines 190

*const* verwenden 158

*constexpr* Empfehlung 161, 163

Dreierregele beachten 432

*enum class* bevorzugen 276

falsche Form von *delete* 293

*override* verwenden 492

smart pointer verwenden 298, 906

Variable initialisieren 40, 382

virtueller Destruktor notwendig 509

C++11

Initialisierungsliste 50, 592

vererbter Konstruktor 472

*C2DKreis* 413, 416

*C2DPunkt* 378, 478, 480, 495

*C3DPunkt* 470, 478, 495, 499

*call\_once* *Siehe* Multithreading

callback-Funktion 453

*case*-Marke 104

*catch* *Siehe* Exception-Handling

*char* 41, 59

*char\_traits* 730, 739

*char16\_t*, *char32\_t* 41, 63

*chrono* 829

*duration* 831

*duration* als Parameter 834

*duration* Arithmetik 834

*ratio* 829

*system\_clock* 837

Uhr 837

Uhrzeit als String 838

Zeitdauer 831

*cin* 4

*cl* Kommandozeilen Compiler 11

*class* 362, 705

closure *Siehe* Lambda-Ausdruck

*cmath* 85

*cmath*-Funktionen 122

Code-Ausschnitt 28

*switch* und *enum class* 276

Compiler

Fehlermeldung 6

*complex* 739, 817

*concept* 767

*requires* 767, 768

*type traits* 770

condition coverage *Siehe* Test,

Bedingungsüberdeckung

*condition\_variable* *Siehe* Multithreading

*const* 157

*const*-Korrektheit 160

Elementfunktion 451

konstante Variable 161

Objekt 450

symbolische Konstante 158

*const\_cast* *Siehe* Konversion

*constexpr* 161

Funktion 163

if *constexpr* 107

Konstante 161

Konstante eines Klassentyps 381

Konstruktor 381

Container

Adapter 613

Array 259

assoziativer 620

Klasse 592

Konstruktor 781

*pmr* 615

polymorphic memory resources 615

sequenzieller 610

*std array* 248

verkettete Liste 311

Containerklasse

als Basisklasse 509

*continue*-Anweisung 109

*copy*, *copy\_if* *Siehe* STL-Algorithmus

*copy\_backward* *Siehe* STL-Algorithmus

Core Guidelines *Siehe* C++ Core Guidelines

*cos* 122

*count* für *map*, *set* 787

*count*, *count\_if* *Siehe* STL-Algorithmus

*cout* 4

von mehreren Threads 885

CPU Auslastung *Siehe* Leistungs-Profiler

Cross-Reference-Liste 625

Csv-Tabelle 665

## D

Datei *Siehe* Stream-Klassen

Datenbank 269

Datenelement

Initialisierung 365

Datenkapselung 374

Datentyp 37

arithmetischer 111

- dynamischer 488
  - eingebauter 111
  - fundamentaler 111
  - Gleichheit bei Klassen 365
  - minimal wählen 54
  - rekursiver 311
  - skalarer 272
  - statischer 488, 489
  - Stringliteral 301
  - vordefinierter 111
  - Datumsvergleich 72
  - Deadlock *Siehe* Multithreading
  - Debug Konfiguration 24
  - Debugger 127
    - ‘Datenhaltepunkt’ 131
    - Ablaufverfolgungspunkt 131
    - Array anzeigen 250
    - Aufrufliste 129
    - Ausführungsposition anzeigen 129
    - Bedingungen für Haltepunkte 130
    - Befehlsfenster 133
    - Breakpoint 127
    - Darstellung selbstdefinierter Daten 133
    - Darstellung von Klassen 271
    - Datentipps 133
    - Direktfenster 132
    - Haltepunkt 127
    - lokale Variablen 128
    - nächste Anweisung 129, 130
    - natvis 133
    - Programm beenden 129
    - Programm unterbrechen 129
    - Rückgabewerte anzeigen 132
    - schrittweise Programmausführung 128
    - überwachte Ausdrücke 128
    - Vektor anzeigen 594
    - Werte anzeigen 128
    - Werte protokollieren 131
  - decltype* 757
  - Default-Argument 88
    - eines Klassentyps 379
    - Elementfunktion 365
    - vs. überladene Funktionen 89, 332
  - Definition
    - von Variablen 37
  - Definition einsehen *Siehe* Editor
  - delete* 293
    - destroy* 293
  - delete[]* 293
  - Deployment *Siehe* Software-Verteilung
  - deque* 610
    - shrink\_to\_fit* 608
  - Dereferenzierungsoperator 280
  - design by contract 575
  - Design eines Softwaresystems 96
  - Destruktor 382
    - Aufruf 382
    - ausgeführte Anweisungen 383
    - delete* 383
    - implizit erzeugter 384, 471
    - Klasse mit Arrayelement 383
    - Reihenfolge der Aufrufe 469, 578
    - rein virtueller 519
    - temporäres Objekt 383
    - virtueller 507
    - virtueller und *final* Klassen 508
  - Dezimalbruch 113
  - Dezimalliteral *Siehe* Literal
  - Dezimalsystem 44
  - direkte Basisklasse *Siehe* Basisklasse
  - Direktzugriff 647, 667
  - Direktzugriff *Siehe* Stream-Klassen
  - do*-Anweisung 75
  - doppelt verkettete List *Siehe* Liste,
    - verkettete
  - double* 111
  - Dreierregel *Siehe* Klassen
  - dreifacher Vergleichsoperator *Siehe*
    - Operatorfunktion *<=>*
  - duration* *Siehe* chrono
  - dynamic\_cast* *Siehe* Konversion
  - dynamisch erzeugte Variablen 290, 291,
    - Siehe* new
    - Fehlermöglichkeiten 296
  - dynamische Programmierung 264
  - dynamischer Datentyp *Siehe* Datentyp
  - dynamischer Speicher 291
  - dynamisches Array 298
    - Initialisierungsliste 299
- ## E
- e *Siehe* Eulersche Zahl, *Siehe* Eulersche Zahl
  - Editor
    - Aufrufhierarchie anzeigen 28
    - Definition einsehen 14
    - Intellisense 13
    - Tastenkombinationen 12
    - Umbenennen 17
  - Einerkomplement 45
  - Einfachvererbung 484
  - Einfügeiterator 778

Eingabeoperator >> 661  
 Element einer Klasse 363  
 Elementfunktion 363  
   Aufruf 376  
   Default-Argument 365, 460  
   *inline*-Funktion 364  
   Namensgebung 394  
 Elementinitialisierer 409, 410  
   Basisklasse 468  
*else*-Zweig 68  
*emplace*, *emplace\_back* 536  
*end* Iterator 596  
*endl* 660  
 Endlosschleife 74, 75  
 Entwicklungsumgebung 1  
*enum* 272  
   Arraygrenze 275  
   C/C++03 273  
   C++11 275  
   *class* 275  
   Konversionen 274  
   schwach typisierter Aufzählungstyp 273  
   stark typisierter Aufzählungstyp 275  
   *using* Aufzählungstyp 277  
 Enumerator 272  
*equal* *Siehe* STL-Algorithmus  
*erase*  
   string 206  
   vector 597  
*erase-remove* Idiom *Siehe* STL-Algorithmus  
 Eratosthenes, Sieb des 251  
*errno* 555  
   *system\_error* 588  
 Erweiterbarkeit 515  
   und virtuelle Funktion 512, 521  
 Escape-Sequenz 60  
 Eulersche Zahl  
   *M\_E* () 123, 180  
 Exception-Handling 171, 555  
   Aufrufstack 558  
   *catch* 172  
   *catch(...)* 571  
   *catch*, Exception-Handler 559  
   *current\_exception* 572  
   Exception auslösen 564  
   Exceptions im Konstruktor 578  
   Exception-Sicherheit 585  
   Fehler und Exceptions 573  
   *noexcept* 175, 584  
   *rethrow\_exception* 572  
   stack unwinding 558

*throw* 174, 564  
   *try* 172, 556  
   *try* und abhängige Anweisungen 573  
   zentrale Fehlerbehandlung 571  
*exception*-Klasse 561  
   abgeleitete Klasse 567  
   Klassenhierarchie 562  
   *what* 566  
*exceptions* (Funktion)  
   bei Streams 562  
*exp* – math. e-Funktion 122  
*explicit*  
   Konstruktor 439  
 explizite Instanziierung *Siehe* Template,  
   *Siehe* Template  
 explizite Spezialisierung 737, *Siehe*  
   Funktions-Template

## F

*fabs* 331  
 Fakultät 124  
   rekursiv 103  
 Fehler und Exceptions *Siehe* Exception-  
   Handling  
 Fehlermeldung des Compilers 6  
 Fehlerrate, Software 127  
 Fibonacci-Zahlen 81  
   aus Array 255  
   dynamische Programmierung 264  
   iterativ 81  
   rekursiv 103  
   Variablen-Template mit Nicht-Typ-  
     Parametern 749  
 FIFO *Siehe* Liste  
 filesystem 672  
*fill*, *fill\_n* *Siehe* STL-Algorithmus  
*final* 463  
   für eine Klasse 463  
   für eine virtuelle Funktion 499  
   und virtuelle Destruktoren 508  
*find*, *find\_if* *Siehe* STL-Algorithmus  
*find\_end* *Siehe* STL-Algorithmus  
*find\_first\_of* *Siehe* STL-Algorithmus  
 flache Kopie 428, 432  
*float* 111  
 fold-Ausdruck *Siehe* Funktions-Template  
*for*-Anweisung 73  
   bereichsbasierte *for*-Schleife 601  
*forward* 539  
*forward\_list* 610

ForwardIterator 775

*free* 296

freier Speicher 291

*friend*

    Funktion 415

    Klasse 416

*front\_inserter* 778

frühe Bindung *Siehe* Bindung

*fstream* *Siehe* Stream-Klassen

*function-try-block* 579

Fünferregel *Siehe* Klassen

Funktion 76, 327

    als Parameter übergeben 453

    am besten passende 333

    anonyme 690

    Aufruf 77

    callback-Funktion 453

    exakt passende 334

    Größe der Parameterliste 95

*inline* 327, 364, 460

    letzte überschreibende 501

    Name 92, 93, 96

    Parameter 77

    Programmierstil 92

    Spezifikation 92

    überladene 79, 330, 506

    überladene vs. Default-Argument 89, 332

    überschreibende 491, 506

    Variablen-Template mit Nicht-Typ-

        Parametern 749

    verdeckte 491, 506

    virtuelle 490

    virtuelle mit *override* 491

    virtuelle, Aufruf 493

Funktionsaufruf 98

    Nachbedingung 92

Funktionsdefinition 98

Funktionsobjekt 677

Funktions-Template 704, 705

    Aufruf 706

    explizite Spezialisierung 718

    fold-Ausdruck 764

    Metaprogrammierung 723

    Nicht-Typ-Parameter 715

    statische lokale Variablen 712

    überladenes 720

    variadisches Funktions-Template 761

Funktions-Typ

    mit *std*

*function* 452

Funktionswert 76

Funktor 677

*future* *Siehe* Multithreading

## G

Ganzzahldatentyp 41, 42

    mit Vorzeichen 42, 45

    ohne Vorzeichen 42, 43

ganzzahlige Typangleichung 53

Ganzzahlliteral *Siehe* Literal

garbage collection 903

Gauß'sche Osterformel 82

*gcd* *Siehe* *std::gcd*

Geburtsstagsproblem von Mises 125, 251

Generalisierung *Siehe* Vererbung

*generate*, *generate\_n* *Siehe* STL-Algorithmus

generische Programmierung 703

generische Zeiger *Siehe* Zeiger

gestreute Speicherung 126

*getline* 663

Gleitkommatyp 111

    Genauigkeit 111

    Wertebereich 111

Gleitkommaformat 111

    binäres 111

    dezimales 111

    Überlauf (overflow) 113

    Unterlauf (underflow) 113

Gleitkommaliteral *Siehe* Literal

Gleitkommawerte

    Gleichheit 120

Goldbach'sche Vermutung 82

*goto*-Anweisung 108

Gregorianischer Kalender 67

größter gemeinsamer Teiler 103, *Siehe* *std::gcd*

Guidelines *Siehe* C++ Core Guidelines

Gültigkeitsbereich 370

    Klasse 367

## H

Haltepunkt *Siehe* Debugger

Handlungsreisender *Siehe* Problem des

Hash-Container *Siehe* assoziative Container

Hash-Tabelle 126

hat ein-Beziehung 481

Hauptspeicher 37

Header-Datei 458

Heap 291

Hexadezimalliteral *Siehe* Literal

Hexadezimalsystem 44  
 Hilfe *Siehe* Online-Hilfe  
 Hornerschema 252  
 HTML-Format 665  
 Hyperbelfunktionen 122  
 Hypothekendarlehen 124

## I

IDE 1  
*identifier* 35  
*if*-Anweisung 68  
   *if constexpr* 107  
   mit Variablendefinition 90  
*istream* *Siehe* Stream-Klassen  
 Implementationsdatei 459  
 implizite Typzuweisung *Siehe* *auto*  
 include-guard 186  
 Indexoperator [] *Siehe* *operator*  
 indirekte Basisklasse *Siehe* Basisklasse  
 information hiding 374  
 inheriting constructor *Siehe* Konstruktor,  
   vererbter  
 Initialisierung  
   Array 253  
   dynamisch erzeugte Variable 292  
   *struct* 271  
 Initialisierungsliste 50, 592  
   bei Argumenten 77  
   bei *return* 77  
   Initialisierung in Klassen 365  
   mit *auto* 401  
   Sequenzkonstruktor 398  
*inline* Funktion *Siehe* Funktion  
*inline* Variable *Siehe* Variablen  
 InputIterator 775  
*insert*  
   string 204  
   vector 597  
*inserter* 778  
 Installation von Visual Studio 2019 1  
 Instanz *Siehe* Objekt  
*int* 41  
*int8\_t*, *int16\_t*, *int32\_t*, *int64\_t* 42  
 integral conversion 53  
 integral promotion 53  
 integrierte Entwicklungsumgebung 1  
 Intellisense *Siehe* Editor  
   *switch* und *enum* 277  
 Interface-Klasse 521  
 Invariante 154

Klasseninvariante bei Vererbung 475  
*iostream* 4  
*iota* *Siehe* STL-Algorithmus  
*is\_sorted* *Siehe* STL-Algorithmus  
 ist ähnlich wie ein-Beziehung 520  
 ist ein-Beziehung 475  
   als notwendige Bedingung 479  
   *C2DPunkt* und *C3DPunkt* 478, 495, 519,  
     520  
   Kriterium 478  
   Quadrat und Rechteck 477  
   und Umgangssprache 479  
*istream\_iterator* 780  
*istringstream* 223, 346  
 Iterator 340, 596, 774  
   *begin*, *end* global 596, 782  
   Bidirektional- 775  
   Einfüge- 778  
   Forward- 775  
   Input- 775  
   *next*, *prev*, *advance* 783  
   Output- 775  
   RandomAccess- 775  
   Stream- 779  
   Umkehr- 776  
   ungültiger 599, 610, 624, 797

## J

*join* *Siehe* Multithreading  
 Julianischer Kalender 67

## K

Klasse 267, 361, 362  
   abgeleitete 461  
   abstrakte 517  
   als Datentyp 405  
   Diagramm 395  
   Element 363  
   Gleichheit des Datentyps 365  
   im Debugger 271  
   Interface 521  
   Konsistenzbedingung 392  
   Name Datenelement 394  
   Name Elementfunktion 394  
   Namensgebung 394  
   reales Konzept 478  
   Schnittstelle 373  
   *static* Element 443  
   verdecktes Element 465

- Vergleichsoperator 271
- Klassen
  - Dreierregel 432
  - Fünferregel 538
- Klassendiagramme 395
- Klassenelement *Siehe* Klasse
- Klassengültigkeitsbereich *Siehe* Gültigkeitsbereich
- Klassenhierarchie 462, 480
  - systematische Konstruktion 515
- Klasseninstanz *Siehe* Objekt
- Klasseninvariante 392
- Klassen-Template 725
  - abhängige Parameter 732
  - Ableitung von Typ-Argumenten 743
  - argument deduction 743
  - Array mit range-checks 747
  - Default Argument 731
  - erzeugte Elemente 726, 735
  - explizite Spezialisierung 737
  - mehr spezialisiertes 737
  - Nicht-Typ-Parameter 733
  - partielle Spezialisierung 736
  - primäre Deklaration 736
  - Quelltext 731
  - selbstdefinierte Ableitung von Typ-Argumenten 745
  - Spezialisierung 726
  - template<>* 737
  - und abgeleitete Klassen 742
  - variadisches Klassen-Template 766
  - vollständige Spezialisierung 737
  - vordefinierte Ableitung von Typ-Argumenten 744
- Klassifikation 477
- kleinste Quadrate 813
- kleinstes gemeinsames Vielfaches *Siehe* *std::lcm*
- Knoten *Siehe* Liste, verkettete
- Kommandozeilen Compiler *cl* 11
- Kommentar 4, 167
  - Dokumentationskommentar // 170
  - Doxygen-Kommentar 171
  - Intellisense-Kommentar 170
  - verschachtelter 184
  - Zeilenendkommentar // 167
- komplexe Zahlen 817
- Komplexität 611
- Komponententests *Siehe* Unittests
- Komposition 480
- Konkordanzliste 625
- konkreter Typ 523
- Konsistenzbedingung 392
- Konsolen-Anwendung 2
- Konstante 46
  - const* *Siehe* *const*
  - constexpr* *Siehe* *constexpr*
- konstante Referenzparameter 357
- konstante Variable *Siehe* *const*
- Konstruktor 378
  - Aufgabe 382
  - automatischer Aufruf 378
  - Datenelement einer Klasse 410
  - Default- *Siehe* Standardkonstruktor
  - delegierender 457
  - Exceptions 579
  - explicit* 439
  - expliziter 440
  - expliziter C++11 440
  - function-try-block* 579
  - konvertierender 439
  - Kopier- *Siehe* Kopierkonstruktor
  - new* 379
  - Reihenfolge der Aufrufe 410, 469, 487
  - Standard- *Siehe* Standardkonstruktor
  - und Exceptions 574
  - und virtuelle Funktionen 504
  - vererbter 472
  - virtueller 507
- Konstruktor-Initialisierer 409
- Kontextmenü *Siehe* Menü, Kontextmenü
- Kontobewegung* (Beispiel) 269
- Kontravarianz
  - bei *function* 701
  - bei Templates 771
- Konversion 52
  - benutzerdefinierte 337
  - const\_cast* 289
  - dynamic\_cast* 489
  - einschränkende 50
  - explizite 438
  - Funktionsschreibweise 288
  - implizite 438
  - Konversionsfunktion 442
  - Parameter 52
  - reinterpret\_cast* 289
  - sichere 53
  - static\_cast* 288
  - typecast-Schreibweise 288
  - übliche arithmetische 55, 117
  - von Zeigern 286, 288
  - zwischen abgeleiteten Klassen 482

Kopierkonstruktor 426  
     =default 436  
     =delete 436  
     Aufruf bei Parameterübergabe 429  
     der Basisklasse aufrufen 471  
     implizit erzeugter 427, 471  
 Kovarianz  
     bei *function* 701  
     bei Templates 771  
 kritischer Abschnitt *Siehe* Multithreading

## L

Lambda-Ausdruck 690  
     capture list 692  
     closure 698  
     Datentyp 691  
     Erfassungsliste 692  
     generischer 700, 707  
     lokale Funktion 692  
     *mutable* 694  
     Rückgabety 690  
     Zugriff auf umgebende Variablen 692  
 landesspezifische Einstellungen 230  
     *locale* 231  
 Laufzeitfehler und Exceptions 557  
 Laufzeitvergleiche 121  
*lcm* *Siehe* *std::lcm*  
 Leistungs-Profiler 135  
     CPU Auslastung 135  
     Speicherauslastung 136  
 letzte überschreibende Funktion 501  
*lexicographical\_compare* *Siehe* STL-  
     Algorithmus  
 LIFO *Siehe* Liste  
 limits.h 42  
 lineares Suchen 260  
 Linker 25  
*list* 610, 728  
 Liste, verkettete 311  
     ausgeben 314  
     doppelt verkettete 321  
     FIFO 317  
     Knoten 311  
     Knoten einfügen 313  
     LIFO 314  
     Speicher freigeben 318  
     Vergleich mit Array 319  
     Zeiger auf letztes Element 315  
 Literal 46  
     Binär- 47

    boolesches 63  
     Dezimalliteral 46  
     Ganzzahl-, Datentyp 47  
     Ganzzahlliteral Trennzeichen 46  
     Gleitkomma- 114  
     Hexadezimal- 47  
     Oktal- 47  
     String- 301  
     Suffix 47  
     Zeichen- 60  
*locale* *Siehe* Landesspezifische Einstellungen  
*lock\_guard* *Siehe* Multithreading  
*log* – Logarithmusfunktion 122  
 lokales Menü *Siehe* Menü, Kontextmenü  
 Lokalität 327  
*long* 41  
*long double* 111  
*long long* 41  
 L-Wert Referenz 526

## M

M\_E 180, *Siehe* Eulersche Zahl  
 M\_PI *Siehe* Pi, *Siehe* Pi  
*main* Funktion 24  
     return-Wert 79  
*make\_pair* 729  
*make\_shared* *Siehe* smart pointer  
*make\_unique* *Siehe* smart pointer  
 Makro 179  
     \_\_cpp\_xxx 198  
     \_\_has\_cpp\_attribute 199  
     \_\_has\_xxx 198  
     Compiler Feature Test 198  
*malloc* 296  
 Manipulator 660, 669  
 Mantisse 111  
*map* 728, *Siehe* assoziative Container  
 math.h 85  
*math.h*-Funktionen 122  
 mathematische Funktionen 122  
 mathematische Spezialfunktionen 122  
 Matrix 263, 609  
*max* *Siehe* STL-Algorithmus  
*max\_element* *Siehe* STL-Algorithmus  
 Median 809  
 Mehrfachvererbung 484  
*MeinStack* 727  
*MeinString* 375  
     *c\_str()* 389  
     Destruktor 385



Klasseninvariante 392  
 Konstruktor 384, 413  
 Kopierkonstruktor 429  
 Operator [] 420, 452  
 Operator + 419, 420  
 Operator < 419  
 Operator = 434  
 Standardkonstruktor 406  
*mem\_fn* *Siehe* Binder  
 memory leak 293, 306, 307  
 Menü  
     Kontextmenü 19  
*merge* *Siehe* STL-Algorithmus  
 Methode der kleinsten Quadrate 813  
 Microsoft-Dokumentation *Siehe* Online-Hilfe  
*min* *Siehe* STL-Algorithmus  
*min/max* Makro Fehler 790  
*min\_element* *Siehe* STL-Algorithmus  
 Mischen (*merge*) *Siehe* STL-Algorithmus  
 Mises, Geburtstagsproblem 125, 251  
*mismatch* *Siehe* STL-Algorithmus  
 Module (C++20) 194  
 move-Konstruktor *Siehe* move-Semantik  
 move-Semantik 528, 529  
     move-Konstruktor 530  
     move-Kopierkonstruktor für eigene  
         Klassen 536  
     move-Zuweisungsoperator 530  
     move-Zuweisungsoperator für eigene  
         Klassen 536  
*std*  
     *move* 530  
 STL 535  
 move-Zuweisungsoperator *Siehe* move-  
     Semantik  
*multimap* *Siehe* assoziative Container  
*multiset* *Siehe* assoziative Container  
 Multithreading 841  
     *async* 843, 863  
     *async* vs. *thread* 868  
     atomare Datentypen 879  
     Bedingungsvariable 898  
     *call\_once* 896  
     *condition\_variable* 898  
     *cout* von mehreren Threads 885  
     Deadlock 892  
     *future* 855, 860  
     *join* 848  
     kritischer Abschnitt 876  
     *lock\_guard* 882  
     *lock\_guard adopt\_lock* 895

*lock\_guard defer\_lock* 895  
 Mutex 881  
 Parallel Patterns Library (PPL) 901  
*promise* 858, 859  
 Reader-Writer-Lock 890  
*recursive\_mutex* 886  
*recursive\_timed\_mutex* 887  
*scoped\_lock* 882, 892, 894  
*shared\_mutex* 890  
*spurious wakeup* 900  
*std thread*-Klasse 847  
*std timed\_mutex* 887  
 Thread 841  
*thread* Destruktor 848  
*thread* vs. *async* 868  
*thread\_local* 897  
*try\_lock\_for* 887  
*try\_lock\_until* 887  
*unique\_lock* 891

## N

Nachbedingung 154, 575  
 nachstehender Rückgabetyp *Siehe*  
     Rückgabetyp  
 Name  
     Bezeichner 35  
     Datenelement 394  
     Elementfunktion 394  
 Namensbereich 176, 541  
     Aliasname 552  
     globaler 545  
     Grundlagen 176  
     *inline*-namespace 553  
     *rk1* 86  
     *using*-Deklaration 85, 545  
     *using*-Direktive 85, 547  
     *using*-namespace 547  
     vs. *static* Klassenelement 447  
*namespace* *Siehe* Namensbereich  
*new* 291  
     *nothrow* 300  
*new* überladen *Siehe* Operatorfunktion *new*  
*new[]* 292  
*next\_permutation* *Siehe* STL-Algorithmus  
 Nicht-Typ Parameter *Siehe* Funktions-  
     Template, *Siehe* Klassen-Template  
*noexcept* *Siehe* Exception-Handling  
*none\_of* *Siehe* STL-Algorithmus  
*not*  
     ~ bitweise 57

logisches 64  
*npos* 204  
*nth\_element* *Siehe* STL-Algorithmus  
 NULL 185, 285  
*nullptr* 285  
 Nullterminator *Siehe* Nullzeichen  
 nullterminierter String 301  
   *atoi* 219  
   *atoi* 219  
   *sprintf* 219  
   *sscanf* 219  
   *strcmp* 303  
   *strcpy* 303  
   *strlen* 303  
 Nullzeichen 60, 301  
 Nullzeiger *Siehe* Zeiger  
*numeric\_limits* 43, 738  
 numerische Integration 125

## O

Objekt 294, 362  
   Namensgebung 394  
 objektbasierte Programmierung 523  
 Objektdatei 25  
 objektorientierte Analyse 391  
 objektorientierte Programmierung 361  
 objektorientiertes Design *Siehe* OO-Design  
*ofstream* *Siehe* Stream-Klassen  
 Oktalliteral *Siehe* Literal  
 Online-Hilfe 21  
   *F1* 21  
   Microsoft-Dokumentation 21  
 OO-Design 391  
   iterativer Prozess 391  
   Komposition 480  
   OOAD 391  
   und abstrakte Basisklassen 520  
*operator* 339  
   () -Aufrufoperator 677  
   [] 420, 452  
   = 431  
   = *default* (C++11) 434, 436  
   = *delete* (C++11) 434, 436  
   Konversionsfunktion 442  
 Operator =  
   der Basisklasse aufrufen 472  
   implizit erzeugter 431, 471  
 Operatorfunktion 339  
   (++/ --, Präfix- vs. Postfix) 418  
   << 344

  <=> 421  
   >> 344  
   als Elementfunktion 418  
   binäre Operatoren 419  
   *delete* 346  
   *delete[]* 348  
   eingängige Symbole 340  
   globale 341  
   *new* 346  
   *new[]* 348  
   placement *new* 349  
   spaceship-Operator <=> 421  
*or*  
   | bitweise 57  
   logisches 64  
*ostream\_iterator* 779  
*ostreamstream* 223, 346  
 OutputIterator 775  
*override* 491

## P

*pair* 631, 728  
*par* *Siehe* parallele Algorithmen  
 Parallel Pattern Library (PPL) *Siehe*  
   Multithreading  
 parallele Algorithmen 820  
   *par* 820  
 Parameter 327  
   Konversion 52, 116  
   Referenz- 84, 352  
   Wert- 77, 84, 350  
   Wertparameter Kopierkonstruktor 430  
   Wertparameter temporäres Objekt 430  
*partial\_sort*, *partial\_sort\_copy* *Siehe* STL-  
   Algorithmus  
*partition* *Siehe* STL-Algorithmus  
 Pascal-Dreieck 100, 265  
 path coverage *Siehe* Test,  
   Bedingungsüberdeckung  
 perfect forwarding 539  
 Permutation der Elemente 800  
 Pfadangaben, 'in 61  
 Pfadüberdeckung *Siehe* Test  
 Pi,  $\pi$  123, 180  
   M\_PI 123, 180  
   numerische Integration 125  
*placeholder* 455, *Siehe* Binder  
 placement *new* *Siehe* Operatorfunktion *new*  
 Platzhalter *Siehe* placeholder, *Siehe* Binder  
*pmr* *Siehe* Container

Pointer *Siehe* Zeiger  
 polymorphic memory resources *Siehe*  
     Container  
 Polymorphie 361, 494  
     mit Zeigern 494  
 Polynom 252  
 Positionszeiger 651  
 postcondition *Siehe* Nachbedingung  
 pow – math. Potenzfunktion 122  
 Prädikat 681  
 pragma *Siehe* #pragma  
 Präprozessor 178  
 precondition *Siehe* Vorbedingung  
 Predicate 681  
 Primzahl 82, 251  
 priority\_queue 613  
 private *Siehe* Zugriffsrecht  
     Element Basisklasse 464  
 Problem des Handlungsreisenden 124  
 Programmgerüst 518  
 Programmverifikation 153  
 Projekt 23  
     Dateien automatisch speichern 25  
     Dateien speichern 25  
 Projektmappe 25  
 Projektmappen-Explorer 25  
 promise *Siehe* Multithreading  
 protected *Siehe* Zugriffsrecht  
     Element Basisklasse 464  
 Protokollklasse 518  
 Prozess 842  
 Prozessorzyklen seit Programmstart 110  
 public *Siehe* Zugriffsrecht  
     Element Basisklasse 464  
 push\_back 592  
 push\_front 778  
 Pythagoräische Zahlentripel 82

## Q

Quadrat 475, 476  
 queue 613, 732, 733  
 Queue 317

## R

RAI 577  
     resource acquisition is initialization 577  
     Ressourcen im Destruktor freigeben 577  
     und smart pointer 907  
 RAM 37

rand() *Siehe* Zufallszahlen  
 random access 667  
 RandomAccessIterator 775  
 range based *for*-Schleife 601  
 ratio *Siehe* chrono  
 Raw-String-Literal *Siehe* string  
 rbegin Iterator 777  
 rdtsc read time stamp counter 110  
 Reader-Writer-Lock *Siehe* Multithreading  
 realloc 299  
 Rechteck 475, 476  
 Rechtschreibprüfung 624  
 recursive\_mutex *Siehe* Multithreading  
 Refactoring *Siehe* Umbenennen  
 Referenzparameter 352, 357, *Siehe*  
     Parameter  
     Initialisierung 352  
     konstante 357  
 Referenzsemantik 505  
 Referenztyp 351, 352  
     Rückgabetypp 355  
 regex *Siehe* regulärer Ausdruck  
 Regressionsgerade 813  
 regulärer Ausdruck  
     Email-Adressen 239  
     Exceptions 233  
     regex 233  
     wregex 233  
 rein virtuelle Funktion 517  
 reinterpret\_cast *Siehe* Konversion  
 Rekursion  
     Effizienz 102  
     Einfachheit 102  
 Rekursive Funktion 98  
 Release Konfiguration 24  
 remove, remove\_if *Siehe* std  
 rend Iterator 777  
 replace  
     string 206  
 replace, replace\_if *Siehe* STL-Algorithmus  
 replace\_copy, replace\_copy\_if *Siehe* STL-  
     Algorithmus  
 requires *Siehe* concept, *Siehe* concept  
 resource acquisition is initialization 577,  
     *Siehe* RAI  
 Ressourcen-Freigabe bei Exceptions *Siehe*  
     RAI  
 return-Anweisung 76, 110  
 reverse *Siehe* STL-Algorithmus  
 reverse\_iterator 776  
 rk1 Namensbereich (utilities) 86

Assert 146  
 Rohzeichenfolge (raw string) *Siehe* string  
 rotate *Siehe* STL-Algorithmus  
 RoundToInt 126  
 Rückgabetyt 76  
   nachstehender 402, 699  
   Referenztyp 355  
 Rückgabewert 76  
 Rundungsfehler 114  
 R-Wert Referenz 526

## S

Schaltjahr 67  
 Schleifen 72  
 Schleifenbedingung 73, 75  
 Schleifenkörper 73  
 Schlüsselwert 322  
 Schlüsselwort 36  
   kontextsensitiv 492  
 Schnittstelle  
   einer Klasse 373  
 schrittweise Programmausführung 128  
 schrittweise Verfeinerung 96  
 scoped\_lock *Siehe* Multithreading  
 search, search\_n *Siehe* STL-Algorithmus  
 seekp 668  
 sequenzielle Container 610  
 sequenzieller Dateizugriff *Siehe* Stream-Klassen  
 Sequenzkonstruktor *Siehe*  
   Initialisierungsliste  
 set 728, *Siehe* assoziative Container  
 shared\_mutex *Siehe* Multithreading  
 shared\_ptr 296, *Siehe* smart pointer  
   für Arrays 919  
 short int 41  
 Short-Circuit Evaluation 66  
 shrink\_to\_fit *Siehe* vector, deque, string  
 shuffle *Siehe* STL-Algorithmus  
 Sieb des Eratosthenes 251  
 signed char 41  
 signed long 41  
 Signifikand 111  
 SimpleUnitTests *Siehe* Unittests  
 sin 122, 252  
 Singleton 447  
 size (bei Container) 593  
 size\_t 58  
 size\_type 204, 593  
 sizeof 58  
 sleep 873  
   sleep\_for 873  
   sleep\_until 873  
 smart pointer  
   leerer smart pointer 910  
   make\_shared 905  
   make\_unique 905  
   shared\_ptr 390, 903, 914  
   und RAII 907  
   unique\_ptr 297, 903, 912  
   weak\_ptr 903, 921  
 Software, Fehlerrate 127  
 Software-Verteilung 31  
 sort *Siehe* STL-Algorithmus  
 Sortieren  
   Array, durch Auswahl 258  
   Array, mit sort 595  
   Container, mit sort 595  
 spaceship Operator <=> *Siehe*  
   Operatorfunktion <=>  
 span 252  
 späte Bindung *Siehe* Bindung  
 Speicherauslastung *Siehe* Leistungs-Profiler  
 Speicherleck (memory leak) 293, 306, 307  
 Speicherplatzbedarf Objekt 371  
 Spezialisierung  
   eines Funktions-Templates 706  
   eines Klassen-Templates 726  
   explizite, Funktions-Template 718  
   und Vererbung *Siehe* Vererbung  
   vollständige 737  
 Spezifikation 138  
   einer Funktion und Exceptions 573  
   Funktion 92  
 spurious wakeup *Siehe* Multithreading  
 sqrt – math. Wurzelfunktion 122  
 srand() *Siehe* Zufallszahlen  
 stable\_partition *Siehe* STL-Algorithmus  
 stable\_sort *Siehe* STL-Algorithmus  
 stack 613, 732  
 Stack 98, 99, 350, 725  
 Standard Template Library *Siehe* STL  
 Standardbibliothek 84, 591  
   C, C++-Version 85  
 Standardkonstruktor 406, 408  
   =default 407, 436  
   =delete 407, 436  
   implizit erzeugt 407, 412, 471  
   Teilobjekt 468  
 Standardkonversion 52, 115, 335  
 static

- Klassenelement 443
- Klassenelement vs. globale Variable 446
- Klassenelement vs. Namensbereich 447
- static\_assert* 165
- static\_cast* *Siehe* Konversion
- statischer Datentyp 488, 489
- std
  - array* *Siehe* Array
  - function* *Siehe* Funktions-Typ
  - optional* 638
  - variant* 641
  - any* 644
  - begin, end* (global) 782
  - gcd* größter gemeinsamer Teiler 123
  - lcm* kleinstes gemeinsames Vielfaches 123
  - remove, remove\_if* 797
- stdafx.h/.cpp 24
- STL 591, 703
- STL-Algorithmus 773
  - accumulate* 810
  - accumulate* parallel 826
  - adjacent\_difference* 812
  - adjacent\_find* 786
  - all\_of* 791
  - any\_of* 791
  - binary\_search* 807
  - copy* 606, 777
  - copy, copy\_if* 755, 792
  - copy\_backward* 792
  - count, count\_if* Algorithmus 787
  - equal* 605, 787
  - equal\_range* 808
  - erase-remove* Idiom 798
  - fill, fill\_n* 795
  - find* 605, 785
  - find\_end* 789
  - find\_first\_of* 786
  - find\_if* 686, 785
  - for\_each* 774
  - for\_each* parallel 823
  - generate, generate\_n* 796
  - inner\_product* 812
  - inplace\_merge* 809
  - iota* 796
  - is\_sorted* 806
  - lexicographical\_compare* 788
  - lower\_bound* 807
  - max* 790
  - max\_element* 791
  - merge* 808
  - min* 790
  - min\_element* 791
  - mismatch* 788
  - next\_permutation* 800
  - none\_of* 791
  - nth\_element* 807
  - parallel accumulate* 826
  - parallel for\_each* 823
  - parallel reduce* 826
  - parallel search* 789
  - parallel sort* 822
  - parallel transform\_reduce* 827
  - partial\_sort* 806
  - partial\_sort\_copy* 806
  - partial\_sum* 812
  - partition* 803
  - reduce* parallel 826
  - replace* 775, 794
  - replace\_copy, replace\_copy\_if* 795
  - replace\_if* 794
  - reverse* 801
  - rotate* 801
  - search* 789
  - search* parallel 789
  - shuffle* 802
  - sort* 339, 595, 606, 683, 803
  - sort* parallel 822
  - stable\_partition* 803
  - stable\_sort* 803, 805
  - swap* 530, 706, 799
  - swap* C++11 531
  - swap\_ranges* 800
  - transform* 794
  - transform\_reduce* parallel 827
  - unique* 798
  - upper\_bound* 807
- Stoppuhr 837
- strcmp* *Siehe* nullterminierter String
- strcpy* *Siehe* nullterminierter String
- Stream
  - in Container kopieren mit *std*
    - copy* 781
  - mode *app* 668
  - mode *ate* 668
  - seekg* 667
  - tellg* 668
  - tellp* 668
- Stream-Iterator 779
- Stream-Klassen 647
  - << 659
  - >> 661
- Binärmodus 649, 653

- close* 650
  - Csv-Tabelle 665
  - Datei 647
  - Direktzugriff 647
  - eof* 656
  - exceptions* 652
  - Fehler 651
  - flush* 655
  - fstream* 647, 650
  - good* 651
  - ifstream* 647, 649
  - mode*-Parameter 649
  - ofstream* 647, 650
  - open* 648
  - read* 655
  - sequenzieller Dateizugriff 647
  - Textmodus 649, 659
  - write* 653
  - Zustand 651
  - strenge schwache Ordnung 683, 805
  - strict weak ordering 683, 805
  - string* 201, 217, 729
    - at* 207
    - c\_str* 209
    - Elementfunktionen 204
    - erase* 206
    - from\_chars* 220
    - Index 207
    - insert* 204
    - Konstruktoren 203
    - Konversionsfunktionen 217
    - Konversionsfunktionen C++17 *from\_chars* 220
    - Konversionsfunktionen C++17 *to\_chars* 222
    - length* 204
    - Literal 202
    - Literal mit Postfix s 202
    - Raw-String-Literal 214
    - replace* 206
    - Rohzeichenfolge (raw string) 214
    - shrink\_to\_fit* 608
    - size* 204
    - to\_chars* 222
    - to\_string* 217
    - u16string* 229
    - u32string* 229
    - Unicode 229
    - Unicode Raw-String-Literal 229
    - Vergleichsoperatoren 210
  - String*
    - Groß-/Kleinbuchstaben 230
    - Literale 214
    - toupper* 230
    - string\_view* 225
    - Stringliteral *Siehe* Datentyp
    - Stringstream 223
    - strlen* *Siehe* nullterminierter String
    - strstream* 219
    - struct* 267, 362
      - Initialisierung 271
    - strukturierte Bindung 633
    - Suchen
      - binär 260, 807
      - lineares 260
    - swap*
      - Spezialisierungen für die STL 719
    - swap*, *swap\_ranges* *Siehe* STL-Algorithmus
    - switch*
      - Code-Ausschnitt 276
    - switch*-Anweisung 104
      - mit Variablendefinition 90
    - symbolische Ausführung *Siehe* symbolisches Ablaufprotokoll
    - symbolische Konstante *Siehe* const
    - symbolisches Ablaufprotokoll 152
      - Beziehungen zwischen Variablen 155
    - Symbolleiste 20
    - Syntaxfehler 6
    - Syntaxregel 34
    - system\_error* 588
- T**
- Tabelle der virtuellen Funktionen 502
  - tan* 122
  - Taylor-Reihe Sinus 252
  - Teilobjekt 463
  - Template *Siehe* Klassen- oder Funktions-Template
    - Argument 730
    - explizite Instanziierung 717, 735
    - Funktions- 705
    - Variablen- 748
  - Template-Argument
    - abgeleitetes 706
    - explizit spezifiziertes 710
    - Konversionen 708
  - template-id* 726
  - Template-Metaprogrammierung 723
  - Template-Parameter 705
  - temporäres Objekt 379

Test 153, *Siehe* Unittests

- Bedingungsüberdeckung 140
  - Black-Box Test 139
  - Dokumentation 144
  - Funktionen 141
  - mentale Einstellung 142
  - Pfadüberdeckung 140
  - SimpleUnitTests* 146
  - Testfall 139
  - Test-First-Programming 148
  - Testfunktionen 144
  - verallgemeinerter 152
  - virtuelle Funktion 511
  - White-Box Test 139
  - Zweigüberdeckung 139
- Textmodus (stream) 649
- then*-Zweig 68
- this*-Zeiger 377
- thread*
- als Array-Element 851
  - als Container-Element 851
  - Exception in 858
  - Lambda-Ausdruck starten 849
- Thread *Siehe* Multithreading
- primärer 842
  - Priorität 842
- thread\_local* *Siehe* Multithreading
- thread*-Klasse *Siehe* Multithreading
- throw* *Siehe* Exception-Handling
- tie* *Siehe* strukturierte Bindung
- time stamp counter 110
- tokenize* 213, 251
- Toolbar *Siehe* Symboleiste
- traits*-Klassen 739
- transform* *Siehe* STL-Algorithmus
- Trapezregel 125
- Trennzeichen *Siehe* Literal
- try* *Siehe* Exception-Handling
- Tupel 632, 766
- Typ-Alias *Siehe* using-Deklaration
- Typangleichung 335
- ganzzahlige 55
- type traits 750
- typedef* 244
- typename* 705
- Typfeld 513
- Typ-Inferenz 756, *Siehe* auto
- Typmerkmal *Siehe* type traits
- Typumwandlung, ganzzahlige 53

## U

- u16string* 229, *Siehe* string
  - u32string* 229, *Siehe* string
- überladene
- Funktion *Siehe* Funktion
  - Funktions-Templates 720
- überschreibende Funktion 491
- Uhr *Siehe* chrono
- Uhrzeit als String *Siehe* chrono
- uint8\_t*, *uint16\_t*, *uint32\_t*, *uint64\_t* 42
- Umkehriterator 776
- Umlaute 62
- UML-Diagramm
- Vererbung 462
- unbestimmter Wert einer Variablen 39
- Unicode
- Zeichen *char16\_t*, *char32\_t* 63
- Unicode string *Siehe* string
- union* 362
- unique* *Siehe* STL-Algorithmus
- unique\_lock* *Siehe* Multithreading
- unique\_ptr*
- für Arrays 919
- unique\_ptr* *Siehe* smart pointer
- Unittests 146
- AreEqual* 146
  - Assert* 146
  - SimpleUnitTests* 146
  - static\_assert* 166
- unordered\_map*, *set* usw. *Siehe* assoziative Container
- unsigned char* 41
- unsigned int* 41
- unsigned long long* 41
- unsigned short int* 41
- using*
- enum*-Typ in *switch* 277
- using*-Deklaration *Siehe* Namensbereich
- mit Basisklasse 467
  - Typ-Alias 244
- using*-Direktive *Siehe* Namensbereich

## V

- valarray* 812
  - value\_type* 732
- Variablen 37
- Beziehungen zwischen 155
  - globale 38
  - inline* 448

- lokale 39, 69, 77
- Name 35, 37, 169
- unbestimmter Wert 39
- Variablen-Template 748
- variadisches Funktions-Template *Siehe* Funktions-Template
- variadisches Klassen-Template *Siehe* Klassen-Template
- vector* 244, 249, 592, 728
  - emplace* 536
  - erase* 597
  - Initialisierungsliste 592
  - insert* 597
  - Konstruktoren 594, 598
  - mehrdimensionaler 609
  - shrink\_to\_fit* 608
  - Speicherverwaltung 607
  - vector<bool>* 609
- Verallgemeinerung *Siehe* Vererbung
- Verbundanweisung 69
- verdeckte Funktion 483, 491
- verdecktes Klasselement 465
- Vererbung 361, 460, 461, 475
  - auf verdeckte Elemente zugreifen 466
  - C2DPunkt* und *C3DPunkt* 470, 478, 495, 519, 520
  - Diagramm 462
  - Generalisierung 475
  - ohne virtuelle Funktionen 524
  - Quadrat und Rechteck 477
  - Spezialisierung 475
  - Verallgemeinerung 475
- Vergleichsoperatoren
  - für Strings 210
- Verhaltensklasse 518
- Verifikation *Siehe* Programmverifikation
- Verschiebekonstruktor *Siehe* move-Semantik
- Verschiebesemantik *Siehe* move-Semantik
- Verschiebezuweisungsoperator *Siehe* move-Semantik
- vertausche* 153
- virtual function table 502
- virtual table pointer 503
- virtuelle Basisklasse 486
- virtuelle Funktion 488, 490, 510
  - Aufruf 493
  - rein virtuelle 517
  - Test 511
  - und Erweiterbarkeit 512
  - Voraussetzungen 497
- virtueller Destruktor *Siehe* Destruktor

- Visual C++ Versionsnummern 184
- Visual Studio Versionsnummern 184
- void* 78
- void\** *Siehe* Zeiger
- Vorbedingung 154, 575
- vptr* *Siehe* virtual table pointer
- vtbl* *Siehe* virtual function table

## W

- wahlfreier Dateizugriff *Siehe* Stream-Klassen
- wahlfreier Zugriff 647, 667
- Warteschlange 317
- wchar\_t* 41, 62
- weak\_ptr* *Siehe* smart pointer
- Wertparameter *Siehe* Parameter
- while*-Anweisung 74
- Wiederholungsanweisungen 72
- Wiederverwendbarkeit 515
- Windows-Zeichensatz 60
- write* Stream-Klasse 653
- wstring* 201, 729

## X

- xor*
  - ^ bitweise 57

## Z

- Zahlensystem zur Basis B 44
- Zeichenliteral *Siehe* Literal
- Zeiger 279
  - ==*, *!=*, *<*, *<=*, *>* oder *>=* 287
  - Aliasing 284
  - auf Elementfunktion 456
  - explizite Typkonversion 286, 288
  - Fehlermöglichkeiten 296
  - Nullzeiger 285
  - void\** 286
  - Zeigervariable 280
  - Zuweisung 283
- Zeigerarithmetik 598
- Zeilenendkommentar *Siehe* Kommentar
- Zeitaufwand 611
- Zeitdauer *Siehe* chrono
- Zufallszahlen
  - minstd\_rand()* 87, 815
  - rand()* 86, 124
  - random* 814
  - srand()* 87



Zugriffsrecht 371

aus der Basisklasse ändern 467

Basisklasse 463

*class* 372

Element Basisklasse 464

*private* 371

*protected* 371

*public* 371

*struct* 372

Zuweisung

Konversion 52

Zuweisungsoperator = *Siehe* operator

Zweierkomplement 45

Zweigüberdeckung *Siehe* Test

zyklomatische Komplexität 95

## Θ

Θ xx, 33

# C#/C++-Schulungen

## Training – Workshops – Coaching

Prof. Richard Kaiser führt seit über 20 Jahren Seminare über C, C++, C# usw. durch. Diese Seminare richten sich an Software-Entwickler, die C#/C++ professionell einsetzen wollen. Der Lehrstoff wird an zahlreichen Beispielen illustriert und durch Übungen ergänzt, in denen die Teilnehmer praxisnahe Programme entwickeln.

### ► C++ mit Microsoft Visual C++ 2019

Diese Seminare decken den gesamten Sprachumfang von C++17 und C++20 ab. Je nach den Voraussetzungen und Wünschen der Teilnehmer können das einführende

- C/C++ Grundlagen
- Objektorientierte Programmierung
- Die C++-Standardbibliothek (STL)

und fortgeschrittene Themen sein:

- Lambda-Ausdrücke, Templates, Multithreading
- Die C++11/C++14/C++17/C++20 Erweiterungen
- Embedded C++

Die C++-Seminare sind nicht an Microsoft Visual C++ gebunden, sondern können auch mit anderen Compilern (z.B. gcc) durchgeführt werden.

### ► C# und .NET mit Visual Studio 2019

Die C#-Seminare stellen C# umfassend dar:

- C# Grundkurs
- C# Aufbaukurs
- Software Qualitätssicherung
- C# für C/C++-Sprachumsteiger

Die Inhalte können an die Wünsche der Teilnehmer angepasst werden.

Diese Seminare können auch auf Englisch durchgeführt werden. Sie werden vor allem als Firmenseminare (inhouse) durchgeführt. Öffentliche Seminare finden an der Technischen Akademie Esslingen (<https://www.tae.de/>) statt.

► Weitere Informationen: <https://www.rkaiser.de/>