
Handbuch Historisches Mauerwerk

Josef Maier

Handbuch Historisches Mauerwerk

Untersuchungsmethoden
und Instandsetzungsverfahren

2. Aufl. 2012



Springer Vieweg

Dr. Josef Maier
Erlangen
Deutschland

ISBN 978-3-642-25467-3
DOI 10.1007/978-3-642-25468-0

ISBN 978-3-642-25468-0 (eBook)

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

Springer Vieweg
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012
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 Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Einbandentwurf: WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE.
Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de

Vorwort zur 2. Auflage

Zehn Jahre sind vergangen, seit das „Handbuch Historisches Mauerwerk“ erschienen ist. Das Baugeschehen hat sich in der Tat seit damals immer mehr vom Neubau weg hin zur Instandsetzung von Altbauten entwickelt. In den Jahren 2001 bis 2008 wurden nach einer Erhebung des Statistischen Bundesamtes nur 3 % der Wohnungen in Wohngebäuden errichtet, ca. 80 % wurden vor 1990 gebaut und sind daher Altbauten. Dennoch betreten die meisten Fachkollegen bei der Mauerwerksinstandsetzung eine „*terra inkognita*“, denn es wurden und werden damals wie heute alle Fachkräfte am Bau hauptsächlich zur Errichtung neuer Gebäude ausgebildet. Das Wissen um das Reparieren und Wiederherstellen oder um das erforderliche Wärme- und Schalldämmen alten Mauerwerks dagegen stellt immer noch eine oft ungeliebte Randerscheinung der Architekten- bzw. der Maurerausbildung dar. Jedoch die Technischen Universitäten Karlsruhe, Aachen und Dresden, um nur die drei wichtigsten zu nennen, sowie einige Fachhochschulen haben seit etwa 10 Jahren die Mauerwerksinstandsetzung in ihrer Bedeutung für das Baugeschehen erkannt und forschen seither erfolgreich am Mauerwerk im Bestand.

Große Fortschritte bei der Mauerwerksinstandsetzung haben seit 1985 die Tragwerksplaner z. B. im Sonderforschungsbereich 315 „*Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke – Baugefüge, Konstruktionen, Werkstoffe*“ an der TU Karlsruhe gemacht. Inzwischen sind auch baukonstruktive und bauphysikalische Forschungen sehr erfolgreich beim Fraunhofer Institut für Bauforschung in Stuttgart durchgeführt worden. Seit 1976 erscheint der „*Mauerwerk-Kalender*“ beim Verlag Ernst & Sohn in Berlin, der sich seit den 1990er Jahren intensiv mit Fragen der Mauerwerksinstandsetzung beschäftigt. Ebenso befasste sich seit 2001 die Fachzeitschrift „*Mauerwerk*“ mit der Problematik des alten Mauerwerks.

Inzwischen haben sich zudem eine Vielzahl von privaten Fortbildungseinrichtungen diesem Thema gewidmet. So wurde seit den 1980-er Jahren an den Handwerkskammern der Maurermeister zum „*Restaurator im Maurerhandwerk*“ fortgebildet, an den Architektenkammern wurden den Mitgliedern immer wieder Seminare zum Thema „*Instandsetzung von Mauerwerk*“ angeboten und vor allem die Wissenschaftlich-technische Arbeitsgemeinschaft WTA in München hat sich in ihren Merkblättern u. a. der „*Mauerwerkssanierung*“ verschrieben. Auch die Werkstätten der Denkmalämter haben sich dem Thema durchaus erfolgreich angenommen. Darüber hinaus entstand eine Fülle von Beiträgen zum Mauerwerk im Bestand in Zeitschriften wie „*Bauhandwerk*“, „*Bausanierung*“, etc.

Ein besonders Gewicht wurde in der Forschung auf die Erkenntnis von Ursachen des Stein- und Mauerwerkzerfalls gelegt und daraus wurde ein vielfältiges Instrumentarium des Stein- und Mauerwerkerhalts abgeleitet. Es war die Stunde der Bauphysik gekommen. Die schier unüberschaubare Fülle dieses chemisch – physikalisch begründeten Instandhaltungsszenarios hat die Praktiker jedoch oftmals vor unüberbrückbaren Verständnishürden stehen lassen. Es fehlte zumeist die Transformierung schwieriger wissenschaftlicher Zusammenhänge in die Erkenntniswelt der Praktiker.

Die 2. Auflage dieses Lehrbuches soll nun die neuesten Erkenntnisse für den Praktiker zusammenstellen und erklären. Es ist in der Tat für den Architekten, Bauingenieur, Denkmalpfleger, Baubeamten in den Bauämtern, selbstverständlich auch für den Maurermeister, für Bauträger und für die Bauverwaltung und nicht zuletzt für den Eigentümer von alten Häusern geschrieben worden, die bislang eine anschauliche Beschreibung der heute möglichen und gängigen Methoden der Untersuchung und Instandsetzung von Mauerwerk vergebens gesucht haben.

Auch für Studenten der Architektur und der Tragwerksplanung sollen hier Erkenntnisse vermittelt werden, die dazu beitragen, vermeidbare Fehler zu verhindern. Ziel ist nicht, allgemein gültige Normen zu entwickeln, da jedes alte Mauerwerk gleichsam ein Individuum darstellt, das ein differenziertes Eingehen auf seine Besonderheiten verlangt.

Der Springer-Verlag hat versucht, das erkannte Desiderat mit dieser 2. Auflage des Fachbuchs auszugleichen. Dafür gebührt ihm großer Dank, speziell dem Senior Editor Engineering Thomas Lehnert.

Erlangen
im September 2011

Josef Maier

Inhalt

1 Einleitung	1
1.1 Denkmalschutz	5
2 Geschichte des Mauerwerks	9
2.1 Mauerwerk aus Natursteinen	9
2.1.1 Antikes Polygonalmauerwerk	10
2.1.2 Unechtes oder Kraggewölbe	11
2.1.3 Trockenmauerwerk	12
2.1.4 Findlingsmauerwerk	13
2.1.5 Antikes Bruchstein- und Quadermauerwerk	13
2.1.6 Mittelalterliches Natursteinmauerwerk	21
2.1.7 Neuzeitliches Natursteinmauerwerk	26
2.1.8 Dekor an Natursteinwänden	33
2.2 Backsteinmauerwerk	37
2.2.1 Mittelalterliche Mauerverbände	42
2.2.2 Mittelalterliche Backsteinformate	44
2.2.3 Mauerverbände in der frühen Neuzeit	44
2.2.4 Neuzeitliche Backsteinformate	44
2.2.5 Dekor an Backsteinwänden	46
2.2.6 Industriell gefertigte Mauerziegel	51
2.2.7 Moderne Mauerverbände und -formate	52
2.3 Historischer Feuchteschutz	54
2.4 Lehmmauerwerk	58
2.4.1 Lehmpisémauerwerk	58
2.4.2 Lehmwände	59
2.4.3 Fachwerkwände	60
2.5 Fundierungen	62
3 Baustoffe	67
3.1 Natursteine	67
3.1.1 Gesteinsarten	69
3.1.2 Bautechnisch wichtige Natursteine	71
3.2 Keramische Baustoffe	82
3.2.1 Bestandteile der keramischen Baustoffe	82
3.2.2 Industriell gefertigte Mauerziegel	83

3.3	Mineralisch gebundene Baustoffe	84
3.3.1	Betonwerk- und -Mauersteine	84
3.3.2	Porenbetonsteine	85
3.3.3	Kalksandsteine	86
3.4	Historischer Mauermörtel	87
3.4.1	Kalkmörtel	87
3.4.2	Zuschlagstoffe	94
3.4.3	Der Baustoff Gips	98
3.4.4	Gipse im Mauerwerk	100
4	Wasseraufnahme	101
4.1	Poren in mineralischen Baustoffen	101
4.2	Wege des Wassers in das Mauerwerk hinein	103
4.2.1	Wasserandrang in flüssiger Form	103
4.2.2	Wasserandrang in Form von Wasserdampf	108
5	Schäden und typische Schadensbilder	117
5.1	Feuchteschäden	117
5.1.1	Schäden an Natursteinmauerwerk	120
5.1.2	Schäden an mehrschaligen Mauerwerken	120
5.1.3	Schäden an Backsteinmauerwerk	122
5.1.4	Allgemeine Schäden am Mauerwerk	124
5.2	Salzschäden	125
5.3	Setzungsschäden und typische Rissverläufe	129
5.4	Thermische Spannungen	132
5.5	Schwindverhalten	133
5.6	Deformationen infolge externer Kräfte	134
5.7	Fachwerk	135
5.7.1	Schäden an Fachwerkwänden	135
6	Mauerwerksdiagnostik	139
6.1	Orientierende Objektbesichtigung	139
6.2	Anamnese	145
6.3	Schadensdokumentation	146
6.4	Untersuchungen ohne wesentliche Eingriffe in die Gebäudesubstanz	150
6.4.1	Feuchtemessverfahren	150
6.4.2	Weitere Untersuchungen und Messverfahren	152
6.5	Entscheidung über das weitere zielgerichtete Vorgehen	157
6.6	Erstellen von Planunterlagen	158
6.6.1	Fotogrammetrie	163
6.7	Probenahme mit Eingriffen in die Gebäudesubstanz	164
6.7.1	Probenentnahme	166
6.7.2	Standsicherheit und Tragfähigkeit	171
6.8	Schalldämmung	174
6.9	Brandschutz	174
6.9.1	Rettungswege	176

6.10 Blitzschutz	176
6.11 Wärmedämmung	177
6.11.1 Wärmedurchgangskoeffizient U	177
6.12 Bewertung der Untersuchungsergebnisse	179
6.13 Untersuchungskosten	182
7 Instandsetzungsmaßnahmen	183
7.1 Trockenlegung feuchten Mauerwerks	183
7.1.1 Nachträgliche Horizontalabdichtung	185
7.1.2 Nachträgliche Vertikalabdichtung	205
7.1.3 Dränagen	213
7.1.4 Salzbekämpfung	215
7.2 Nachträgliches Wiederherstellen von Standsicherheit und Tragfähigkeit	221
7.2.1 Unterfangen nicht mehr tragfähigen Mauerwerks	222
7.2.2 Vernadeln	229
7.2.3 Vernadeln mit vorgespannten Stählen	239
7.2.4 Injizieren, Verpressen	240
7.3 Neues Verfugen und Rissbehandlung	242
8 Reinigung der Mauerwerksoberflächen	247
8.1 Untersuchung der Oberfläche vor dem Reinigen	248
8.2 Unerwünschte, zu entfernende Beschichtungen	249
8.3 Vorgehensweise beim Reinigen	251
8.3.1 Mechanische, trockene Verfahren	253
8.3.2 Mechanische, nasse Verfahren	253
8.3.3 Chemische Verfahren	254
8.3.4 Gefährdung der ausführenden Handwerker	256
8.4 Lärmschutz	257
8.5 Entsorgen von Schlämmen und Strahlgut	258
8.6 Wichtige Regeln beim Reinigen von Mauerwerk	259
8.6.1 Wahl der Reinigungsmethode	259
8.6.2 Abbeizen	259
8.6.3 Entsorgung	260
8.6.4 Qualitätskontrolle	260
8.6.5 Handwerklich saubere Arbeit	261
9 Konservieren	263
9.1 Konservierungsmittel	264
9.2 Durchführung von Konservierungsmaßnahmen	266
9.2.1 Kieselsäureethylester und ihre Anwendung	267
9.2.2 Hydrophobierungsmittel und ihre Anwendung	268
9.2.3 Der Lotoseffekt	269
10 Flankierende Maßnahmen	271
10.1 Baukonstruktive Verbesserungen	271
10.1.1 Steinergänzung	271

10.2	Sanierputz	275
10.2.1	Wie funktionieren Sanierputze?	275
10.2.2	Voruntersuchung	276
10.2.3	Erforderliche Arbeitsgänge	278
10.3	Wärmedämmende Maßnahmen	282
10.3.1	Schäden durch Kondensat	282
10.3.2	Wärmedämmung	282
10.4	Putze	301
10.5	Beschichtungen	307
10.6	Biologische Korrosion	311
10.6.1	Algenbefall	313
10.6.2	Schimmelpilzbefall	315
10.6.3	Beseitigung des Schimmelbefalls	319
	Literaturverzeichnis	323
	Abbildungsverzeichnis	333
	Sachregister	347

Seit alters gehörte die Instandsetzung von Mauerwerk zu den fast alltäglichen Aufgaben der Bauschaffenden und zu ihrem Grundwissen, wobei sie freilich wesentlich weniger effiziente Möglichkeiten dafür besaßen als die heutigen. Dies soll an einem historisch sehr gut überlieferten Schadensfall, der sich in der Mitte des 19. Jahrhunderts ereignet hat, kurz dargestellt werden: (Maier 1992/1993).

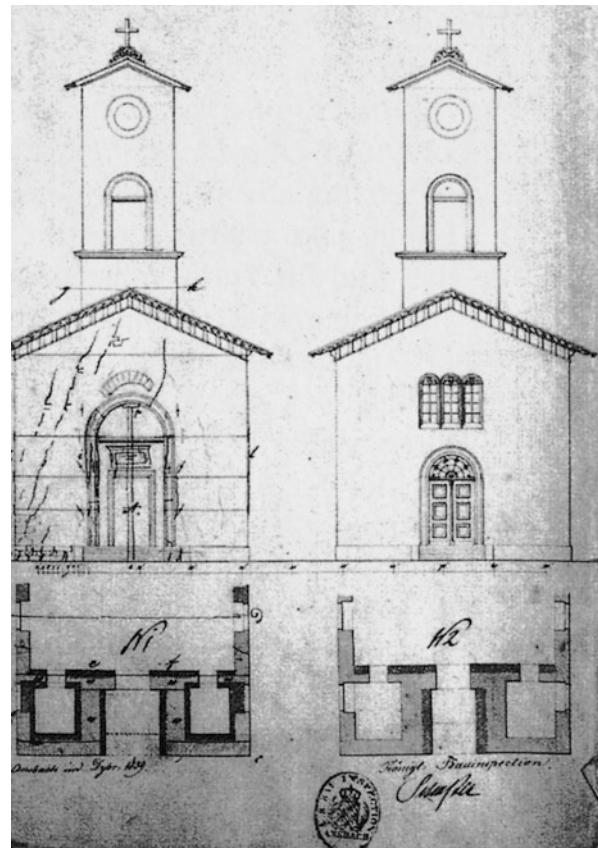
In der Weihnachtsnacht 1839 brachen die Stürze über dem Hauptportal und über den beiden inneren Türen der kurz vor der Vollendung stehenden, neuen Evang.-Luth. Pfarrkirche in Oberdachstetten/Mfr mit lautem Getöse. Der Westgiebel riss von unten nach oben mittendurch und durch den Scheitel des Portalbogens. Die gesamte Westwand und der Turm zersprangen in viele Risse. Der königlich-bayerische Bauinspektor Schuster von der Bauinspektion Ansbach fuhr daraufhin andernfalls nach Oberdachstetten und stellte den Schaden am Kirchengebäude fest. Sein Befund lautete: Die Sandsteine des Mauerwerks waren zu weich und außerdem zu frisch vermauert worden. Das verursachte starkes Schwinden der Steine, was zu großen Rissen führte, die er zunächst mit Hilfe von eisernen Schlaudern in den Griff bekommen wollte. Auch der Mörtel, der für das zweischalige Mauerwerk eingesetzt worden war, erschien ihm nicht fest genug; Proben davon hätten sich zwischen den Fingern zerdrücken lassen.

Der Bauinspektor fertigte überdies zwei Zeichnungen an, die das Rissebild im Westgiebel und im Turm vollständig erfassten. Schuster hat also genau das getan, was auch heutzutage immer noch erste Pflicht eines Schadensgutachters ist, nämlich persönliche Inaugenscheinnahme des Schadens mit erläuternden Skizzen und unverzügliche Veranlassung erforderlicher Sicherheitsmaßnahmen (Abb. 1.1).

Bei der Gründung des Baues und der Erstellung der Fundamente sind nach Meinung des Vorgesetzten von Schuster, des Civilbauinspektors Schulz, ebenfalls große Fehler gemacht worden. Es blieb schließlich nichts anderes übrig, als den desolaten Kirchenneubau abzureißen und ihn von Neuem wieder aufzubauen.

Bauschäden und ihre Beseitigung sind damals wie heute mit großen Kosten und tragischen Schicksalen verbunden. Doch heutzutage sind die Baufachleute nicht so rasch gezwungen, eine Instandsetzung aufzugeben und das schadhafte Mauerwerk abzubrechen, sondern sie besitzen eine Fülle von Sanierungstechniken und – maßnahmen, die auch solch gebrochenes und total gerissenes Sandsteinmauerwerk wieder gebrauchstüchtig werden lässt. Vor den Instandsetzungsversuchen hätte freilich

Abb. 1.1 Kirche von Oberdachstetten. Zeichnung der Westseite mit Eintragung der Risse durch Bauinspektor Schuster vom Dezember 1839 (Staatsarchiv Nürnberg)



eine gründlichere Untersuchung des Mauerwerks und des Baugrundes stattfinden sollen, als sie mit Hilfe der damaligen Kenntnisse vorgenommen werden konnte. Vor 170 Jahren kannte man die physikalischen und chemischen, aber auch die mechanischen und dynamischen Wirkungsmechanismen bei weitem nicht so gut, um eine Instandsetzung des Mauerwerks aufgrund der Schadensursachen wirkungsvoll durchzuführen. Seitdem aber hat die Naturwissenschaft eine Fülle von Möglichkeiten entwickelt, von denen sich der königlich-bayerische Bauinspektor Schuster hat wahrlich nichts träumen lassen. Einen Vorteil allerdings besaß er gegenüber den heutigen Baufachleuten: Er wusste über Natursteinmauerwerk, sein Material und seine Baukonstruktion, bestens Bescheid.

Das ist heute ganz anders. Deshalb muss nunmehr wieder Fachwissen in Erinnerung gebracht werden, das früher selbstverständlicher Besitz aller Bauschaffenden war. Auch die Begriffe, die der Fachmann bei einer Instandsetzung verwendet, sind indessen so verwirrt worden, dass sie erst wieder definiert werden müssen. In den Jahren nach dem Zweiten Weltkrieg verstand die Baufachwelt unter Sanierung nämlich das rigorose Beseitigen geschädigter Bausubstanz. Inzwischen wurde jedoch das Gegenteil davon festgelegt: „Unter dem Begriff Sanierung ist

die Wiederherstellung des alten Zustandes eines geschädigten Objektes unter Berücksichtigung der zeitbedingten Veränderungen zu verstehen. Sie soll die Ästhetik und die funktionalen Eigenschaften des Mauerwerks möglichst nicht verändern“ (Nadoushani 1992).

Eine solche Sanierung beginnt damit, dass die Geschichte des Mauerwerks gründlich kennen gelernt wird. Seine Entstehung und alle nachfolgenden Veränderungen bilden nämlich die Grundlage für die fachgerechte Beurteilung. Deshalb muss zunächst eine Anamnese erfolgen.

Die sachkundige Instandsetzung eines Mauerwerks erfordert eine gründliche Auseinandersetzung mit seinen Baustoffen und ihren wichtigsten Eigenschaften. Deshalb soll die Baustoffkenntnis von den Natursteinen, den gebrannten Mauerziegeln, vom Mauermörtel, seinen Bindemitteln und Zuschlägen in diesem Zusammenhang kurz umrissen werden; eine bei weitem tiefere Kenntnis lässt sich aus der angegebenen Literatur gewinnen. Ein Exkurs über Bauphysik lenkt den Blick auf die Wirkungsmechanismen des in das Mauerwerk eindringenden Wassers in flüssiger und in Form von Wasserdampf. Außerdem müssen die Schäden untersucht werden, die infolge fehlender Kraftschlüssigkeit im Mauerwerksverbund entstanden sind.

Der Fachmann trifft bei seiner ersten Ortsbegehung zunächst wie einst der Bauinspektor Schuster auf typische Schäden und Schadensbilder. Zum einen sind es die große Gruppe der Feuchte- und Salzschäden, die im Verein mit dem Frost Verwitterungsscheinungen herbeiführen, zum anderen sind es Setzungen und Schwinderscheinungen, die Deformationen des Mauerwerks wie Schiefstellungen, Risse, Ausbauchungen und dergleichen verursachen. Auch aus dem Mauermörtel ausgewaschene Bindemittel können zu erheblichen Schäden beitragen. Schließlich sind auch die biogenen Schadensursachen ins Kalkül zu ziehen.

Deshalb befasst sich dieses Buch nicht einseitig nur mit den Wasser- und Salzschäden oder ausschließlich mit den Schäden durch gestörtes Tragverhalten, sondern versucht, einen Überblick über die wichtigsten Schadensursachen insgesamt und deren Beseitigung zu bieten. Dies ist freilich für einen einzigen Autor nicht ganz leicht, da dies viele verschiedene Kenntnisse und den Überblick über disparate Wissenschaften erfordert. Diese Schwierigkeit verdeutlicht die Tab. 1.1.

Dann werden aus der Fülle der von der Wissenschaft angebotenen, bewährten Untersuchungsmethoden die für eine individuell anstehende Mauerwerksinstandsetzung geeigneten ausgewählt und vorgestellt. Der Mauerwerksdiagnostik wird ein breiter Raum eingeräumt, denn die zeichnerische und fotografische Zustandserfassung, die zerstörungsfreien, zerstörungsarmen und zerstörungsintensiven Untersuchungsmethoden verbunden mit Probenahmen und Laboranalysen geben dem Fachmann ein Szenario in die Hände, mit dem er den Schadensursachen schnell auf die Spur kommen kann.

Bei einer Mauerwerksanierung darf heute im Zeichen der Energieeinsparung das Wärmedämmverhalten nicht vernachlässigt werden. Deshalb werden wir uns mit dem nachträglichen Verbessern der Wärmedämmung alten Mauerwerks befassen, um später auftretenden Schäden, z. B. infolge Tauwasserbildung, vorzubeugen. Des Weiteren muss auf die Verbesserung der Schalldämmung eingegangen werden.

Tab. 1.1 Fachleute, die gegebenenfalls bei der Mauerwerksinstandsetzung benötigt werden

Fachmann	Erkenntnisgewinn
Physiker	Untersucht Wirkungsmechanismen im und um das Mauerwerk herum
Chemiker	Befasst sich mit der Chemie der bei der Sanierung eingesetzten Stoffe
Bauingenieur	Beurteilt das Tragverhalten eines Mauerwerks
Baugrundingenieur	Beurteilt die Tragfähigkeit des Baugrunds
Geodät	Legt die Achsen für die verformungsgerechte Bauaufnahme
Vermessungsingenieur	Stellt eine verformungsgerechte Bauaufnahme her
Restaurator	Dokumentiert die historischen Fassungen auf dem Mauerwerk
Bautenschutzfachplaner	Projektet schwierige Instandsetzungsmaßnahmen
Architekt	Ist zuständig für Instandsetzungsplanung bis zur Koordination der Bauleistungen und deren Abrechnung
Denkmalpfleger	Überwacht die Vereinbarkeit der geplanten Maßnahmen mit dem Denkmalschutzgesetz
Archäologe	Erforscht und dokumentiert z. B. aufgedeckte Gräber etc.
Steinmetz	Ergänzt fehlende Natursteinquader und Gesimse
Maurer	Schließt Löcher im Mauerwerk und verfügt es neu
Stukkateur	Überzieht die Mauerwerksoberfläche mit Putz und Stuck
Maler	Befindet und Erstellt Farbfassungen
Gartengestalter	Gestaltet die Umgebung des Mauerwerksfußes
Pflasterer	Stellt Pflasterflächen am Mauerwerk her
Klempner	Erneuert die Blechabdeckung der Simse und Sohlbänke, der Regenrinnen und -rohre

Sobald die Ursachen für die Mauerwerksschäden hinreichend sicher feststehen, kann die Sanierung geplant und schließlich die Instandsetzung selbst durchgeführt werden. Die Industrie stellt dafür eine Fülle von Techniken und Geräten bereit: beispielsweise Sägen für das Aufsägen des Mauerwerks, pneumatische Rammen für das Einschlagen von Spezialblechen, reißfeste Folien, dazu Chemikalien, z. B. Injektionsmörtel, mit denen man Hohlräume im Mauerwerk verfüllt oder verpresst, zum Vernadeln geeignete Stähle, physikalisch wirksame Mittel um Feuchte am Aufsteigen zu hindern, Salzumwandler, Steinergänzungsmörtel, SteinverfestigungsmitTEL, abrasive und nicht abrasive trockene, aber auch nasse Reinigungsverfahren sowie chemische Reinigungsmittel für Mauerwerksoberflächen und vieles anderes mehr. Außerdem stehen dabei heute Fragen der ökologischen Verträglichkeit und der Gesundheitsgefährdung der einzelnen Verfahren und Mittel im Vordergrund.

Nach Abschluss der Instandsetzungsmaßnahme muss die Frage nach deren Nachhaltigkeit und Dauerhaftigkeit des Mauerwerks beantwortet werden. Insbesondere das Hydrophobieren trägt oft sehr zu einer langen Dauerhaftigkeit der Sanierungsergebnisse bei. Zu den flankierenden Maßnahmen, die eine Instandsetzung erst erfolgreich machen, gehören auch der nachträgliche baukonstruktive Schutz des Mauerwerks, sinnvoller Einsatz von Sanierputz und hydrophobierende oder verfestigende Anstriche auf seiner Oberfläche.

Tab. 1.2 Denkmalpflegerische Konzepte

Konzept	Vorgehensweise
Altern lassen	Den Alterungsprozess nicht stören
Pflegen	Pflegende Maßnahmen, die das schadhafte Mauerwerk entweder durch Herabsetzen der Ansprüche oder durch den Einbau neuer Bauteile entlasten
Konservieren	Durch museales Bewahren oder durch Tränkung mit Chemikalien dauerhaft machen
Reparieren	Instandsetzen ist sehr eng mit Reparieren verbunden, darum ist fachgerechtes Reparieren zugleich das Hauptthema dieses Buches
Erneuern	Dem Mauerwerk wächst eine gänzlich neue Schicht zu. Sein Alterungsprozess wird umfassend aufgehoben bzw. beginnt von vorn
Rekonstruieren	Das alte schadhaft gewordene Mauerwerk wird vollkommen entfernt und an seine Stelle tritt ein neues, das sich formal und funktional einem gewissen historischen Leitbild unterwirft

1.1 Denkmalschutz

Historisches Mauerwerk steht oft unter Denkmalschutz. Dessen Postulate und Anforderungen müssen angemessen bedacht sein. Bei Instandsetzungsmaßnahmen von denkmalgeschütztem Mauerwerk ist deshalb eine gute Zusammenarbeit mit den zuständigen Denkmalschutzbehörden erforderlich, sie müssen in denkmalpflegerische Überlegungen eingebunden sein.

Es zeichnen sich dafür sechs verschiedene Konzepte ab: „*Altern lassen, Pflegen, Konservieren, Reparieren, Erneuern, und Rekonstruieren*“¹. Die Inhalte dieser Konzeptionen dienen dem Abbau der semantischen Verwirrung, die sich in die sprachliche Verwendung der Begriffe bei der Instandsetzung auch bei Fachleuten mittlerweile eingeschlichen hat (Wenzel et al. 2000, Tab. 1.2).

Die erste denkmalpflegerische Überlegung, das Mauerwerk einfach sich selbst zu überlassen, nimmt den allmählichen Verlust seiner funktionalen und formalen Bedeutung in Kauf. Es löst sich dem Verfallsprozess folgend in seine materiellen Substanzen auf, verliert auf natürliche Weise seinen Zeugniswert und damit auch seinen Wert für die Denkmalpflege. Praktische Bedeutung gewinnt dieser Zustand allerdings beim Sichern von Ruinen und beim Abbruch verwahrloster Bausubstanz. Es lassen sich allenfalls Fragen seiner Standsicherheit und solche nach der Restlebensdauer stellen.

Bei dem Konzept „*Pflegen*“ bleibt der Alterungsprozess ebenfalls ungestört, aber er wird durch geeignete pflegende Maßnahmen verlangsamt. Das alte, schadhafte Mauerwerk selbst wird dabei entlastet, indem entweder die an es gestellten, funktionalen und ästhetischen Ansprüche herabgesetzt oder von geeigneten neuen, hilfsweise eingesetzten Bauteilen wie Stützpfiler oder Verschleißschichten übernommen werden. „*Von diesem Konzept leitet die Denkmalpflege nicht nur ihren Namen ab, sie favorisiert es auch*“ (Wenzel et al. 2000).

Den beständig fortschreitenden Alterungsprozess kann kein denkmalpflegerisches Konzept vollkommen aufheben, es kann ihn nur theoretisch für eine geraume Weile zum Stillstand bringen. Historisches Mauerwerk kann man beispielsweise

Abb. 1.2 Ansbach. Freigelegte mittelalterliche Stadtmauer innerhalb eines modernen Ladens instandgesetzt und dadurch erhalten



Abb. 1.3 Berlin, Vorderasiatisches Museum. Löwe aus der Stadtmauer von Babylon, 6. Jahrhundert v. Chr.



einem Kunstwerk gleich in einem Schutzraum konservieren, wie es einem Stück der hochmittelalterlichen Stadtmauer in Ansbach widerfuhr (Abb. 1.2).

Oder man stellt es in ein Museum, wie man es mit den glasierten Backsteinmauern aus dem alten Mesopotamien getan hat. Man kann auch die einzelnen, geschädigten Quader abbauen und in einem Schutzraum, einem „*Lapidarium*“ aufbewahren, wie es in den Bauhütten der deutschen Dome üblich ist. Oder das Mauerwerk wird als Bestandteil eines Gebäudes in ein Freiluftmuseum gestellt. Bei solcher Konservierung geht selbstverständlich seine bisherige Funktion und der formale Zusammenhang mit der Umgebung gänzlich verloren (Abb. 1.3).

Historisches Mauerwerk kann statt dessen auch durch eingebrachte Chemikalien getränkt und somit scheinbar „*dauerhaft*“ konserviert werden. Zwar werden auf die-

se Weise seine Form und sein Gebrauchswert erhalten, sein materieller Zeugniswert geht dabei freilich vollkommen verloren.

Das Reparieren erneuert das Mauerwerk partiell und verändert an den Reparaturstellen den Alterungsprozess. Die Lebensdauer des Mauerwerks wird erhöht, denn Schwachstellen werden verbessert, der Zeugniswert wird jedoch beeinträchtigt. Die Reparatur muss sich freilich mit ihrer Leistungsfähigkeit und ihrem formalen Anspruch dem historischen Mauerwerk unterordnen. Sie selbst wird schließlich zum Bestandteil dessen, für das das Mauerwerk Zeugnis ablegt.

Die erneuerten Elemente verstärken das Mauerwerk und geben ihm eine Leistungsfähigkeit, die häufig die des alten übertrifft. Zeugniswert besitzt es aber keinen mehr oder allenfalls noch einen sehr geringen. Die neuen Teile etwa beim Mauerwerksaustausch oder beim Einsatz elektrophysikalischer Elektroden dürfen selbstverständlich nicht verändernd oder gar zerstörerisch auf die alten wirken. Außerdem sollten die neuen Elemente die neuen Anforderungen übernehmen können, ohne dass dabei noch weitere Verluste an historischer Substanz entstehen. Auch erneuernde Maßnahmen werden in diesem Buch beschrieben.

Die Rekonstruktion negiert den Alterungsprozess total. Auch wenn dabei vorhandenes Originalmaterial verwendet wird, handelt es sich dabei niemals um Denkmalpflege, denn es ist fraglos ein überwiegend neues Mauerwerk entstanden. Solche Rekonstruktionen werden oft aus stadtbildpflegerischen Gründen unternommen. Der Wiederaufbau des Römers in Frankfurt/Main, der Frauenkirche in Dresden und der geplante Wiederaufbau des Stadtschlosses in Berlin sind überregional bedeutsame Rekonstruktionsmaßnahmen. Über Rekonstruktion von Mauerwerk redet dieses Buch nicht.

Viele Baupraktiker meinen, es genüge, wenn sie bei der Sanierung alten Mauerwerks gründlich über Bestand und Zustand, über Baugefüge, Konstruktionen und Werkstoffe sowie über physikalisch-chemische Sanierungstechniken Bescheid wissen. Sie vergessen bei aller Euphorie über die Machbarkeit der Technik jedoch allzu oft, sich gründlich und ausreichend mit dem alten Mauerwerk selbst und seiner Geschichte zu befassen, bevor sie es behandeln oder gar misshandeln. Vor allem wenn historisches Mauerwerk Bestandteil eines Kultur- oder Baudenkmals ist, scheitert mancher gut gemeinter Sanierungsversuch daran, dass er die Originalsubstanz, nämlich das Mauerwerksgefüge, Steine und Mörtelfugen sowie insbesondere die Oberflächenstruktur, weitestgehend zerstört. Ohne Kenntnis der historischen Entwicklung ist oftmals nach Abschluss der Instandsetzung aus historischem Mauerwerk schließlich ein gänzlich anderes, neues Mauerwerk geworden.

2.1 Mauerwerk aus Natursteinen

Im Vergleich zu Mauerwerk aus künstlichen Steinen ist die Bedeutung von Natursteinmauerwerk für den Neubaubereich gering, jedoch für die Erhaltung von wertvollen, historischen Bauwerken groß (Schubert 2009).

Seit frühesten Zeiten gilt neben dem Holz der Naturstein als ideales Baumaterial. Bereits vor mehr als 5.000 Jahren brachten die Ägypter den Naturstein – zunächst Tuff- und weichen Kalkstein, später vermehrt Sandstein, aber auch Syenit, Granit, Quarzit, Diorit, Basalt und Porphyrr sowie Gipsstein – für die Mauern in ihren gewaltigen Pyramiden und Tempelanlagen zum Einsatz (Mislin 1988). Im Rahmen der europäischen Megalithkultur, die sich – wie der Name schon sagt – durch die Verwendung sehr großer Steinblöcke beim Bauen auszeichnete, entstand im 2. Jahrtausend v. Chr. die Baukunst der Achäer bzw. der Mykener. Es handelt sich dabei um eine erste griechische Architektur und zugleich um einen frühen Höhepunkt in der Entwicklung der Mauertechnik auf europäischem Boden.



Abb. 2.1 Mauern des antiken Mykene, Ende 2. Jahrtausend v. Chr.

2.1.1 Antikes Polygonalmauerwerk

Die Mauern der achäischen Akropolen wie z. B. die von Mykene, Tiryns u. a., bestehen aus polygonal behauenen Kalktuff- bzw. Kalksteinquadern, die gewöhnlich aus Steinbrüchen in unmittelbarer Nähe der Städte gewonnen wurden. Es handelt sich um zweischaliges Mauerwerk, wobei zwischen den beiden wuchtigen Schalen eine Füllschicht aus Erde und Steinbrocken eingebracht worden ist (Durm 1910a). Die einzelnen Steine wurden in ungefähr waagerechten, jedoch zumeist nicht sehr parallel, in Wellen verlaufenden Schichten lagerhaft verlegt. Das Prinzip der durchhängende, leichte Wellen bildenden Lagerfuge findet sich auch an den Mauern Trojas aus dem 2. Jahrtausend v. Chr. Die Forschung nennt es „*Undulation*“ (Klinkott et al. 2001). Ihre Stoßfugen standen in aller Regel nicht senkrecht auf der Lagerfuge sondern schräg, was an der Burgmauer von Mykene noch heute deutlich sichtbar ist. Die Quadern wurden dabei stets ohne Mörtel zusammengefügt; es handelte sich also um ein Trockenmauerwerk (Abb. 2.1).

In der Hauptsache waren zwei Mauerwerksarten in Gebrauch: das Zyklopen- und das Polygonalmauerwerk. Ersteres besteht aus unregelmäßigen, über- und nebeneinander geschichteten, zumeist riesigen Blöcken. Störende Vorsprünge hatte bereits der Steinhauer abgeschlagen oder wurden im Mauerverband durch kleinere Blöcke ausgeglichen. Der Maurer verfüllte anschließend kleinere Löcher in der Wand mit Zwickelsteinen und glich breitere Fugen mit Erde und Lehm aus. Eine technische und ästhetische Steigerung dieser Mauerwerkskonstruktion zeigen die Polygonalmauern. Bei ihrer Herstellung sortierte der Maurer bei weitem nicht mehr so große, vieleckige, nach Größe und Form zueinander passende Quadern aus und glich ihre Stoßflächen aneinander an. Der Mauerverband zeigte sich jetzt wiederum überwiegend horizontal aufgeschichtet. Die wie gewohnt schrägen Stoßfugen ordnete er nunmehr aber nicht mehr willkürlich, sondern radial um große, zentrale Blöcke an, wobei die dadurch erzielte zusätzliche Verspannung der Steine miteinander nach Art der später aufkommenden Entlastungsbögen dem polygonalen Verband ein hohes Maß an Festigkeit sicherte (Abb. 2.2).

Abb. 2.2 Delphi, Apollontempel – Umfassungsmauer des 6. Jahrhunderts v. Chr. Das Fugenbild ordnet sich radial um je einen zentralen Stein

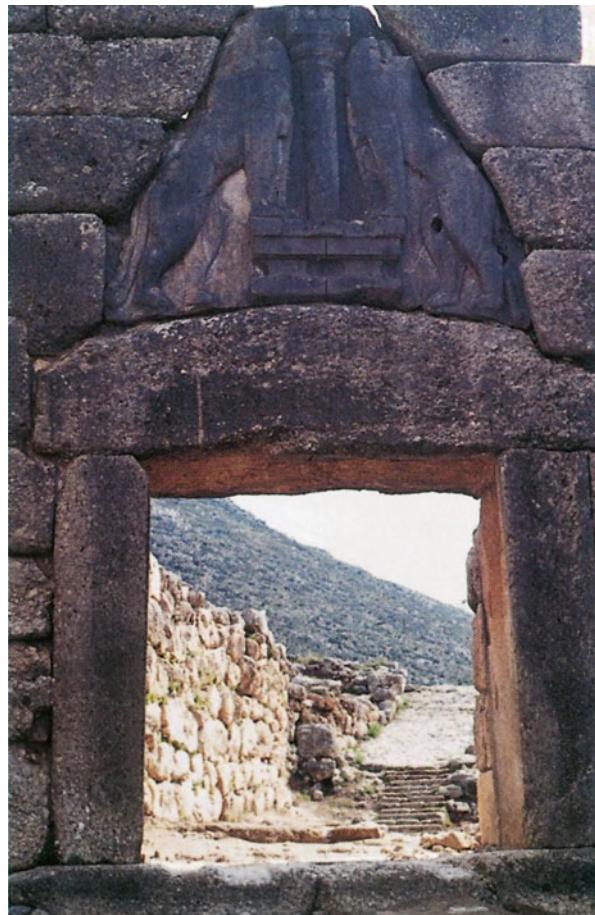


Bereits die Achäer überbrückten Öffnungen im Mauerwerk stets mit waagerechten Sturzsteinen. Diese waren zumeist riesengroß und wogen viele Tonnen. Das beste noch erhaltene Beispiel dafür findet sich am Löwentor in Mykene: Dort überbrückt der 12 Tonnen schwere Sturzstein eine Öffnung in der Burgmauer mit einer Höhe von 3,10 m und einer Durchgangsbreite von ca. 3,00 m. Würde er freilich vom vollen Gewicht des über ihn hinaufgehenden Mauerwerks belastet, müsste er notwendigerweise zerbrechen. In Kenntnis dieser äußerst labilen, gefährlichen Situation verminderten die mykenischen Baumeister das auf dem Sturz lastende Gewicht und setzten unmittelbar über ihm anstelle von Steinen ein offenes Entlastungsdreieck in die Wand; eine Lösung der Gewichtsab- und umleitung im Mauerwerk, die bis heute – allerdings zumeist mit Hilfe eines Bogens – zur statischen Sicherung großer Mauermassen angewandt wird. Eine verglichen mit dem Mauerwerk recht dünne, steinerne Reliefplatte mit entsprechend wenig Gewicht, auf der zwei aufrecht stehende, dem Tor den Namen gebende Löwen dargestellt sind, schließt die dreieckige Entlastungsöffnung über dem Sturz des Löwentors (Abb. 2.3).

Auch bei den beiden, bis zur Spitze schräg aufeinander zugehenden Seiten des Entlastungsdreiecks hat der mykenische Maurer eine einfache Technik angewandt: Von beiden Katheten des Dreiecks her ließ er die jeweils obere Schicht über die untere vorkragen und erreichte so Schicht für Schicht ein allmähliches Schließen der Öffnung. Die zunächst mit ihren Ecken vorkragenden Steine hieb er entlang einer fiktiven Dreieckslinie ab und glättete hernach die gesamte Dreieckskante.

2.1.2 Unechtes oder Kraggewölbe

Die Baumeister dieser bereits griechisch geprägten, insbesondere auch von den Etruskern gepflegte Frühkultur Europas wandten beim Herstellen der Decken runder Räume die Technik des Kraggewölbes an. Sie ließen die Steinblöcke, um einen runden Raum zu überdecken, schichtenweise ringsherum übereinander auskragen und glichen anschließend die jeweils obere Steinschicht durch Abspitzen an die untere an. Schließlich entstanden durch Glätten der gesamten Deckenfläche sehr stabile

Abb. 2.3 Mykene, Löwentor

Scheingewölbe, die heute noch an Rundgräbern aus dieser Zeit in Griechenland und Italien zu beobachten sind (Durm 1910b). Bezeichnend ist auch hier das Fehlen von Mörtel im Gewölbeverband. Echte Gewölbe waren damals in Europa freilich noch unbekannt (Abb. 2.4).

2.1.3 Trockenmauerwerk

Eine ebenso alte Konstruktion von Natursteinmauerwerk ist das Trockenmauerwerk aus kleinen Steinen. Es findet sich in Mitteleuropa noch in Überresten der Wehrmauern der Keltensiedlungen seit dem 3. Jahrtausend v. Chr. Die nur geringfügig bearbeiteten Natursteine wurden ohne Verwendung von Mörtel mit Erde oder Sand, im Verbund mit Holzbalken derartig zusammengesetzt, dass wenige Fugen und nur

Abb. 2.4 Italien, Vetus. Etruskisches Kammergrab mit einem Kraggewölbe



kleine Hohlräume blieben. Größere Hohlräume wurden mit Zwickelsteinen ausgefüllt. Diese Wehrmauertechnik nannten die Römer „*murus gallicus*“ (Cunliffe 1991).

Trockenmauerwerk aus Natursteinen wurde seit dem Mittelalter zumeist für das Herstellen von Stützmauern eingesetzt. Der geübte Maurer hat ein Übereinanderstreifen der Stoßfugen stets vermieden. Die Steine wirken mit ihrem Gewicht gegen den anstehenden Erddruck und verhindern ein Abrutschen der Erdmassen hinter ihm. Da die Erde durch das von hinten andringende Wasser, insbesondere eingesickertes Regenwasser, aus den Fugen gespült werden kann, muss die Mauer sorgfältig aufgeschichtet und ausgezwickt werden. Auf diese Weise entsteht Kraftschlüssigkeit der Steine miteinander und so bleibt die Trockenmauer auch bei ausgespülten Erdfugen formbeständig (Abb. 2.5).

2.1.4 Findlingsmauerwerk

Im ländlichen Bereich, insbesondere in Gegenden, in denen nur die harten, als eiszeitliches Moränengeschiebe rund geschliffenen Findlinge anzutreffen sind, gibt es auch seit alters das Findlingsmauerwerk. Mit Findlingen oder Feldsteinen ist ein regelmäßiger Verband nicht durchführbar, denn die wichtigste Anforderung an einen Steinverband, dass auf keinen Fall Stoßfugen aufeinander treffen, kann mit Findlingen nur schwerlich erreicht werden (Opderbecke 1910). Da sie sich kaum bearbeiten lassen, vermauert man die kleineren Steine unverändert so, wie man sie findet, die größeren aber spaltet oder sprengt man derart, dass Lagerflächen am Stein entstehen. Große Findlinge, sog. „*erratische Blöcke*“ werden gleich an Ort und Stelle gesprengt. Findlingsmauerwerk hat man häufig auch ohne Kalkmörtel mit Lehm- oder Erdfugen hergestellt.

2.1.5 Antikes Bruchstein- und Quadermauerwerk

Seit dem 8. Jahrhundert v. Chr. formten die Griechen ihre schließlich für ganz Europa vorbildliche Architektur und entwickelten die bis heute praktizierte Mau-

Abb. 2.5 Oberdachstetten, Stützmauer am Kirchhof. Die aus Trockenmauerwerk geschichteten Stützpfeiler können dem Erddruck nicht gänzlich standhalten. Sie stellen sich schief, Steine fallen heraus



ertechnik. An Sakralbauten wurde das Mauerwerk aus Marmorblöcken bis in die römische Spätantike ohne Mörtel mit in den Stein eingelassenen Eisenklammern und Bleidübeln verbunden. Außerdem hatten die Baumeister das Mauern mit winkelechten Steinen mit in jeder Schicht versetzten Stoßfugen wohl aus Ägypten übernommen. Zudem wurden viele Quader mit einer „*Anathyrose*“ versehen, d. h. sie wurden an ihren Rändern passgenau geschliffen, wobei der geschliffenen Rand sich rings um die rau belassene, ein wenig tiefer gearbeitete Quaderfläche zog, z. B. an der Echohalle in Olympia (Koenigs 1984). Auf diese Weise entstand ein sehr dichtes Mauerwerk mit einer äußerst hohen Stabilität, in dessen Fugen kaum eine Messerspitze eindringen konnte (Abb. 2.6).

Für untergeordnete Mauern versetzten sie Quader aus Tuff zumeist in Kalkmörtel, was beispielsweise an der Umfassungsmauer der Akropolis in Athen oder an den Substruktions- bzw. Fundamentmauern des Apollotempels in Delphi nachzuweisen ist (Gruben 2001). Zugleich wurden die Steinformate immer kleiner und damit wesentlich handlicher. Die griechischen Maurer überzogen das kleinsteinige, meistens aus leicht zu bearbeitendem Kalktuff (Poros) bestehende Mauerwerk mit einer feinen Kalksinterschicht und täuschten mit malerischen Mitteln wertvolle Marmorblöcke vor.

In der profanen Architektur des Alltags wurde allerdings Mauerwerk aus weniger genau zugehauenen Steinen aus Kalktuff, Kalkstein oder örtlich vorkommender Breccie stets mit Kalk- oder Lehm Mörtel gemauert und regelmäßig innen und

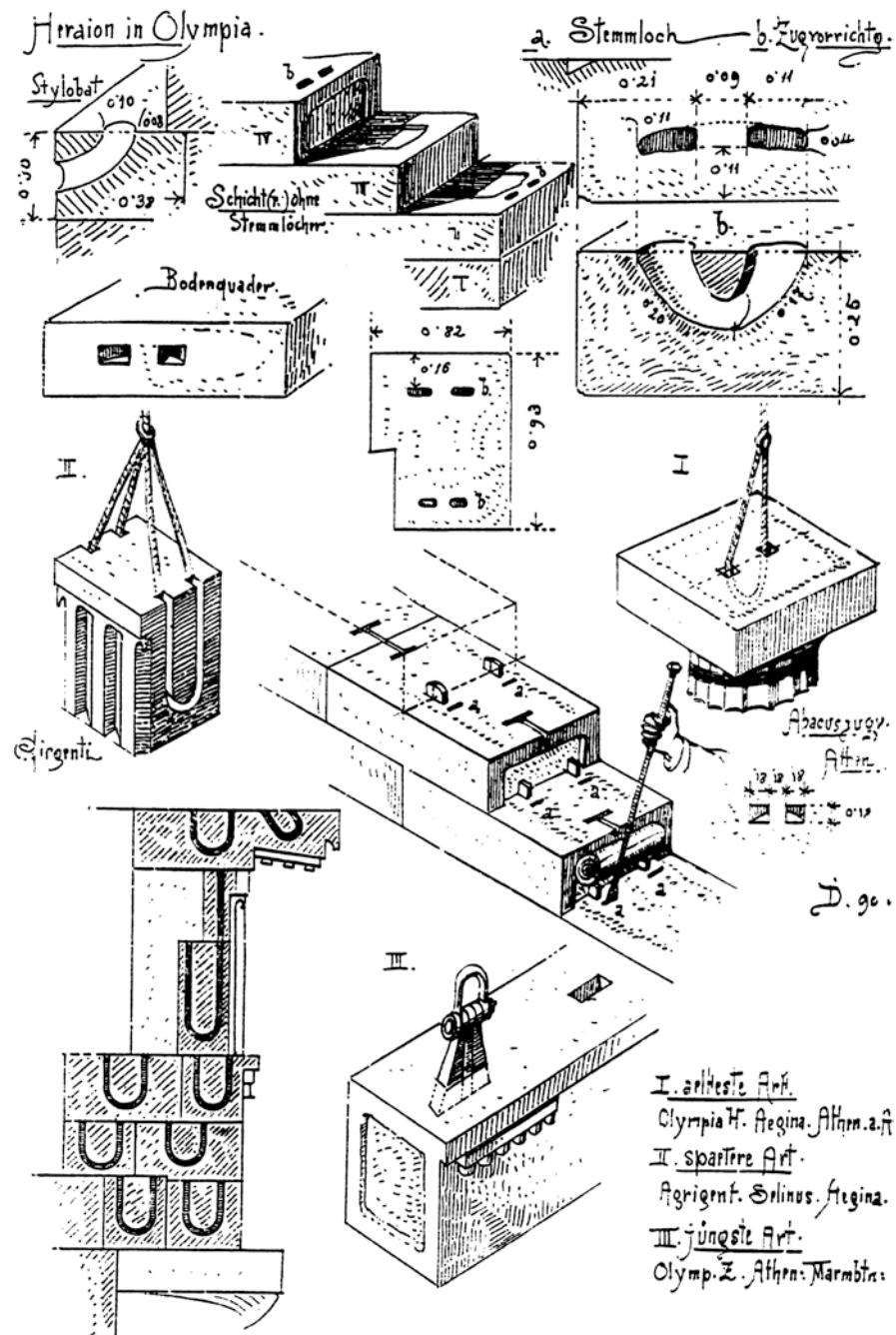


Abb. 2.6 Altgriechisches Mauerwerk aus passgenau zugerichteten rechteckigen Quadern mit eisernen Klammern versetzt und mit Blei ausgegossen

Abb. 2.7 Opus reticulatum mit seinem Fugennetz



Abb. 2.8 Opus incertum.
Das Mauerwerk aus kleinformatigen Steinen wird an den Kanten mit großen Quadern gefasst



außen mit Kalkmörtel verputzt. Schließlich wurden anschließend die Wände herrlich bunt bemalt.

Die Bauweise der Griechen sei nicht zu verachten, schrieb bereits der römische Architekturtheoretiker Vitruv, ein Zeitgenosse des Kaisers Augustus, in seinen zehn Büchern über Architektur (Fensterbusch und Vitruv 1976). Ganz ausführlich und sehr sachkundig berichtet er über die „*Arten des Mauerwerks*“. Zunächst nennt er das zu seiner Zeit (um Christi Geburt) am häufigsten verwendete „*opus reticulatum*“, das netzförmige Mauerwerk, und ein älteres, ebenfalls überaus häufig angewandtes, das „*opus incertum*“, das aus kleinen Steinen gemauerte, unregelmäßige, an seinen Ecken durch starke Quader eingefasste Bruchsteinmauerwerk. „*Die unregelmäßigen Bruchsteine aber, die einer über dem anderen sitzen und unter sich im Verband stehen, geben kein gut aussehendes, aber festeres Mauerwerk als das netzförmige*“ (Abb. 2.7, 2.8).

Solche Mauern finden sich vor allem am gewöhnlichen Hausbau, am Nutzbau schlechthin und an Stützmauern überall in Stadt und Land. Dabei wurden unbehaue ne Natursteinquader in einem entsprechend dicken Bett aus Kalkmörtel in Schich-

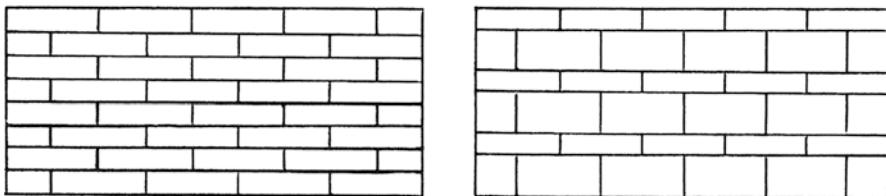


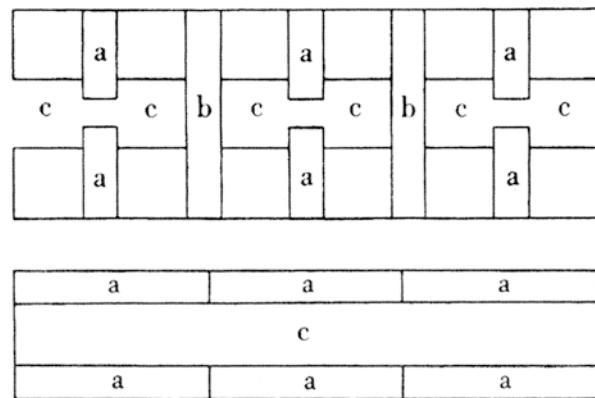
Abb. 2.9 Opus isodomum (*links*), pseudoisodomum (*rechts*)

ten übereinander verlegt. Dickere Mauern wurden stets als Schalenmauerwerk errichtet. Sie bestanden nach Vitruv beiderseits aus Schalen aus behauenen Quadern, die zwischen sich eine „*Füllung aus Mörtelmauerwerk*“ aufwiesen. „*Nachdem im Laufe der Zeit der Mörtel kraftlos geworden*“ war, setzte sich die Füllung und dadurch verloren die Schalen ihren Halt. Deshalb schlug der römische Baumeister vor, die Füllungen beispielsweise aus gebrannten Ziegeln oder festen Natursteinen herzustellen und die Schalen an diesen harten Kern mit verbleiten Eisenklammern zu verankern. „*So nämlich wird das Mauerwerk, nicht einfach aufgeschichtet, sondern regelrecht gebaut, ohne Fehler dauerhaft sein können.*“ Die selbsttragende, innere Füllung verhinderte somit, dass die Schalen durch das Gewicht der Füllmassen nach außen gedrückt werden konnten, und die Verankerungen, dass die äußeren Schalen nachgeben würden. Vitruv empfiehlt damit bereits das Verfestigen von Mauerwerk mit einer der modernen Vernadelung verwandten Technik.

Vitruv fährt dann weiterhin fort: Wenn die griechischen Baumeister aber eine höhere Festigkeit solcher Wände erreichen wollten, „*verlegen sie die rechtwinkelig gearbeiteten Blöcke aus hartem Stein und binden so wie beim Ziegelbau ihre Stoßfugen in den abwechselnden Schichten.*“ Die Griechen verwendeten also einen Mauerverband, bei dem die Steine in jeder Schicht um einen halben Stein gegeneinander versetzt vermauert wurden. Vitruv äußert sich auch zur Aufeinanderfolge der Schichten: „*Diese (sc. die Steine) aber werden in zwei Arten geschichtet: die eine davon wird isodom, die andere aber pseudoisodom genannt.*“ Das isodome Mauerwerk besaß ausnahmslos gleich hohe, das pseudoisodome dagegen abwechselnd hohe Schichten (Abb. 2.9).

Vitruv berichtet weiter: „*Eine andere Bauweise ist die, die sie Enplekton (das verflochtene) nennen, deren sich auch unsere Bauern bedienen. Die Stirnseiten werden glatt behauen. Das übrige wird, in natürlichem Zustand, mit Mörtel geschichtet, durch abwechselnde Stoßfugen verbunden.*“ Die Griechen würden dabei die Steine der beiden Mauerschalen lagerhaft flach versetzen, ihre Längen abwechselnd in den Mauerquerschnitt einbinden lassen und stellten dadurch eine durchgehende Mauer her. Außerdem verlegten sie hin und wieder einzelne Steine, die genauso lang wie die Mauer dick waren, und die infolgedessen an beiden Außenseiten der Mauer jeweils ihre Stirn zeigen. Diese durch die ganze Wand hindurchgehenden Steine, sog. „*Durchschüsse*“, gäben der Mauer im höchsten Maße Festigkeit. Andererseits beklagt der römische Autor die schludrige Arbeit seiner Maurer: „*Die Unseren aber, auf schnelle Ausführung bedacht, richten ihre Aufmerksamkeit nur auf die Aufrichtung der Schalen, versetzen die Steine hochkant und hinterfüllen*

Abb. 2.10 Opus implexum mit sog. Durchschüssen, das sind Steine, die gänzlich durch das Mauerwerk hindurchbinden. Oben griechisches, unten römisches implexum nach Vitruv. a=Außenschale, b=Durchschuss, c=Füllung



sie in der Mitte getrennt mit Bruchsteinbrocken mit Mörtel vermischt. So werden bei diesem Mauerwerk drei Schichten hochgezogen: zwei Außenschalen und eine mittlere aus Füllmasse.“

Bei Ausgrabungen römischer Bauten konnte der von Vitruv geforderte, ideale, selbsttragende Kern im mehrschaligen Mauerwerk selbst an Staatsbauten nur selten nachgewiesen werden. In aller Regel haben die Maurer auch damals schon in den Zwischenraum zwischen zwei Mauerschalen Kalksteinbrocken mit reichlich Kalkmörtel verfüllt. Solche Natursteinmauern waren eben wesentlich billiger zu produzieren und von außen sah man ihnen ihre miserable Füllung nicht an. Diese Mauer-technik findet sich bis heute an Außenwänden historischer Gebäude (Abb. 2.10).

Um sehr hohen Mauern mehr Standfestigkeit und zugleich einen oberen horizontalen Abgleich zu geben, wurden die Natursteinmauern nach oben zu in gewissen Abständen durch Schichten aus gebrannten Ziegeln unterbrochen. Dieselbe aussteifende Funktion konnten aber auch Eichenholzbalken übernehmen, die quer durch den Mauerquerschnitt hindurch reichten. Solche „opus gallicum“ (Binding 1987) genannte „Fachwerke“ sind beispielsweise auf dem bildhaft die Geschichte der Dakerkriege des Kaisers Trajan erzählenden Reliefband der im Jahre 113 n. Chr. geweihten Trajanssäule in Rom dargestellt (Nash 1968a). Statt Hölzer konnten auch vertikale und horizontale Balken aus „opus caementitium“ als sog. „Steinfachwerk“ eingebaut werden, was den Stahlbetonskelettbau des 20. Jahrhunderts gleichsam vorwegnahm (Abb. 2.11).

Die römischen Baumeister schenkten mit zunehmender Erfahrung im Mauerwerksbau der Füllmasse immer mehr Beachtung. Schon Vitruv nennt sie „*materia caementis*“, spätere Autoren sprechen von „*opus caementitium*“. Dieser sog. „Römische Beton“ (Lamprecht 1987) bestand bereits aus Zuschlagstoffen verschiedener Körnung und Kalkmörtel. Um letzterem mehr Festigkeit zu geben, wurden ihm hydraulische Zusätze wie Puzzolanerde, Trass oder Ziegelmehl bzw. Ziegelbruchstücke zugegeben. Dadurch wurden gerade beim Gewölbebau sehr große Spannweiten möglich. Diese Technik versetzte die römischen Baumeister in die Lage, Großbauten wie Amphitheater z. B. das „*Colosseum*“ in Rom, riesige Rundtempel

Abb. 2.11 Rom, Trajanssäule. Beginn des Krieges gegen die Daker



wie das „*Pantheon*“ in Rom, Badehäuser für Hunderte von Menschen z. B. die „*Caracallathermen*“ in Rom oder die „*Römischen Thermen*“ in Nizza zu errichten. Außerdem konnten sie damit die Gewölbe riesiger Markthallen, z. B. die „*Basiliken*“ in Rom, erbauen (Abb. 2.12).

Aber auch Aquäduktbrücken für Wasserleitungen wurden nun Ausdruck römischer Ingenieurkunst, z. B. der „*Pont du Gard*“ oder das „*Aquaeduct an den Mühlen in Barbegal*“ in Südfrankreich. Um die erforderliche verlustfreie Wasserführung bei einem möglichst geringen Gefälle der Rinne zu erreichen, ersetzte der Baumeister die grobkörnigen Kalksteinstücke in seinem „*opus caementitium*“ durch immer weniger grobkörnige Zuschlagstoffe des Gussmörtels zum wasserführenden Gerinne hin, das Geläufe der Rinne selbst wurde zudem durch eine hydraulische Zugabe zum Gussmörtel aus kleinen, mit ihrer Rotfärbung deutlich sichtbaren Ziegelbruchstücken gleichsam „*betoniert*“ (Abb. 2.13).

Die beiden Außenschalen einer geschichteten Wand zeigten zumeist dekorative Fronten. Nicht nur das von Vitruv genannte „*opus reticulatum*“ mit seinen diagonal sich kreuzenden Fugen, sondern vor allem auch das „*opus spicatum*“, im Fischgrätmuster vermauerte schmale Kalkplatten oder gar eine Maueroberfläche aus mosaikartig verarbeiteten Flusskieseln wirkten äußerst dekorativ (Mislin 1988). Hier wurden mit allen möglichen Mischformen dem Einfallsreichtum des Baumeisters keine

Abb. 2.12 Nizza, Römische Thermenmauern. Die zweischalige Kalksteinmauer wird in regelmäßigen Abständen durch Backsteinschichten abgeglichen

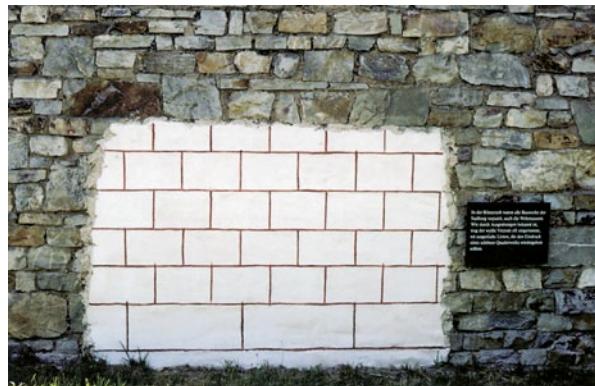


Abb. 2.13 Barbegal, Südfrankreich. Römischer Beton am Aquädukt, das Wasser zu den Mühlen leitet. Der Zuschlagstoff im opus caementitium wird zum wasserführenden Gerinne hin immer feiner, die Rottfärbung weist auf Ziegelbruchstücke und gemahlenen Backstein als hydraulische Zugabe hin



Grenzen gesetzt. Diese Art des Mauerns war natürlich sehr aufwendig und teuer. Deswegen wurden die Wände eines Gebäudes häufig aus einfachen Bruchsteinen errichtet und mit Kalkputz verputzt. Der Putz wurde an den Innenwänden repräsentativer Bauwerke manchmal derart sorgfältig geglättet, dass man sich beinahe darin spiegeln konnte. Außerdem bildete der Verputz eine ideale Fläche, auf der dekorative, die Verwendung großformatiger Werksteine vortäuschende Zierfugen aufgemalt werden konnten (Abb. 2.14).

Abb. 2.14 Bad Homburg, sog. Saalburg am Römischen Limes. Nach Befund rekonstruierter Verputz aus Kalkmörtel mit Quaderfugenmalerei



2.1.6 Mittelalterliches Natursteinmauerwerk

Die Germanenstämme haben durch den Gebäudebestand in den gallischen und germanischen Provinzen des römischen Weltreichs den Steinbau kennen gelernt. Sie haben ihn in der Folgezeit kontinuierlich für sich genutzt. Die neuere Forschung hat diese Kontinuität römischer Mauertechnik vor allem im Rheinland während des gesamten Mittelalters auch an Profanbauten nachweisen können. Auf diese Beziehung zum römischen Bauen weist selbstverständlich auch der Name der ersten mittelalterlichen Stilepoche „*Romanik*“ hin. Das Mittelalter konnte der hochentwickelten römischen Mauertechnik freilich kaum Neuerungen hinzufügen.

Der erste deutsche Kaiser, Karl der Große, hat ganz bewusst und ausdrücklich Bezug zum Bauen Roms genommen, um so die Kontinuität zwischen seinem ursprünglich fränkischen Reich und dem römischen Weltreich zu demonstrieren. Es sollte dadurch für jedermann augenscheinlich werden, dass das römische Weltreich zunächst im Reich der Franken und dann in Deutschland weiterlebte und die Autorität Deutscher Kaiser ungebrochen aus der römischen Tradition Caesars und des Kaisers Augustus hervorging. Mittelalterliche Architektur wurde damit zum Bedeutungsträger (Bandmann 1985). Dies unterstrich zusätzlich der Einbau von antiken römischen Originalbauteilen, sog. „*Spolien*“, in die Außenmauern der Gebäude. Solche Spolien wurden gleichsam wie die Gebeine der Heiligen als kostbare Reliquien angesehen. Die Kaiser des Heiligen Römischen Reichs Deutscher Nation behielten diese formale Verknüpfung mit dem architektonischen Erbe Roms bis zum Ende des Mittelalters aufrecht und beauftragten immer wieder Steinhouer und Maurer aus Italien, die sog. „*Comasken*“, welche ihren Wänden als Ersatz für die Spolien antiken Dekor zu geben wussten (Abb. 2.15).

So nimmt es nicht wunder, dass der mittelalterliche Baumeister die zweischalige Natursteinmauer bevorzugte. Die zumeist unbearbeiteten Kalk- oder Tuffsteine vermauerte er in dicken Kalkmörtelschichten. Lediglich an den Mauerenden und an den Rändern von Öffnungen im Mauerwerk versetzte er große Werksteinblöcke im Verband, die der Füllung zwischen den Außenschalen den erforderlichen Halt gaben (Ludwig 1987). Bei Großbauten wurden aber auch innerhalb der Mauerschalen zuge-

Abb. 2.15 St. Gilles, Südfrankreich. Mittelalterliches Haus mit antikem Dekor



hauene Werksteine (Müller 1990) verwendet, was allerdings sehr aufwendig und teuer war. Die Maurer überzogen alle diese Mauern mit einer Putzschicht, auf die zumeist eine sehr gleichmäßige Fugenmalerei aufgetragen wurde. Auf diese Weise sollte dem Betrachter – wie einst am römischen Mauerwerk – der optische Eindruck vermittelt werden, dass jedes Mauerwerk aus Schalen kostbaren Quaderwerks gefügt worden ist.

Bis in die Neuzeit hinein wurden zum Herstellen von Mauerwerk stets in der Nähe des Bauwerks anstehende Sandsteine, Kalksteine und Tuffe verwandt. Selbstverständlich wurden dort, wo die dichten, mineralisch einheitlichen Sedimentgesteine anstanden und leicht gebrochen werden konnten, eben diese zum Herstellen von Mauern eingesetzt. Als Innenverkleidung wurden insbesondere die Marmore geschliffen und poliert. Darüber hinaus kamen die Bunt-, Stuben- und Schilfsandsteine zur Anwendung. Als außerordentlich haltbar hat sich dabei der rote, insbesondere der mainfränkische Sandstein erwiesen (Mislin 1988).

Die Klebekraft eines fetten Kalkmörtels stellte nicht nur den Verbund im aufgehenden Mauerwerk, sondern auch den einfacher Gewölbe her. Für schmale Gewölbe wie beispielsweise die sog. „*Kellerhälse*“ nutzte der mittelalterliche Maurer diese Klebetechnik geschickt aus und errichtete solche Gewölbekalotten ohne ein Gerüst oder Unterstützungen, indem er die Steine einfach aneinanderklebte¹ (Abb. 2.16).

¹ Der Verfasser hat die enorme Klebekraft des fetten Kalkmörtels anlässlich eines Seminars im Deutschen Zentrum für Handwerk und Denkmalpflege, Propstei Johannesberg bei Fulda, einmal von einem Steinmetzen demonstrieren lassen.

Abb. 2.16 Ronneburg/ Hessen. Mittelalterliches Gewölbe über der Kellertreppe. Hier wurden die Steine in ein auf einer Schalung befindliches Mörtelbett gelegt. Nach dem Ausschalen war dann nur noch der fette Kalkmörtel zu sehen



Abb. 2.17 Fulda, Stadtmauer am Heertor. Deutlich ist das Mauerwerk im Fischgrätverband zu sehen



Am häufigsten wurde der ausgetrocknete Stein aus dem Steinbruch nur geringfügig zugehauen lagerhaft vermauert. Sollte die Mauer eine höhere Tragfähigkeit aufweisen, wurde er als Werkstein steinmetzmäßig rechtwinkelig zugerichtet. Der Maurer errichtete die Außenschalen und den Mauerkerne einer Wand aus Füllmaterial in horizontalen Schichten und zwar zumeist in einem Arbeitsgang, was eine monolithisches und sehr haltbares Mauerwerk ergab. Insbesondere wegen des zunehmenden Steinmangels und der größeren Handlichkeit ging man zu immer kleineren Steinformaten über. Schließlich verarbeiteten die Maurer Steinblöcke mit Schichthöhen zwischen 10–18 cm. Dies ist insbesondere bei Tuffsteinen ohne großen Steinhaueraufwand möglich und lässt sich an rheinischen Bauten wie z. B. am Dom zu Speyer (Böker 1988) unschwer nachweisen. Die Steine wurden zumeist auf Vorrat gearbeitet. Im Laufe des 12. Jahrhunderts zwang die immer größer werdende Steinknappheit die Baumeister dazu, auch schiefrige Kalkplatten zum Mauern zu verwenden. Dabei griff man die antike Technik des „*opus spicatum*“ wieder auf und vermauerte diese schmalen Platten im Fischgrät- oder Ährenmuster. Ein gutes Beispiel dafür findet sich an der Stadtmauer von Fulda (Abb. 2.17).

In der Zeit der Stauferkaiser, im 12. und 13. Jahrhundert, verwandten die Baumeister insbesondere für Wehrbauten Buckelquader, „*opus rusticum*“, (Binding 1987) also Werksteine, deren Kanten genau passend zugearbeitet worden waren,

Abb. 2.18 Büdingen, Schloss. Im unteren Mauerbereich sind noch die Buckelquader vorhanden



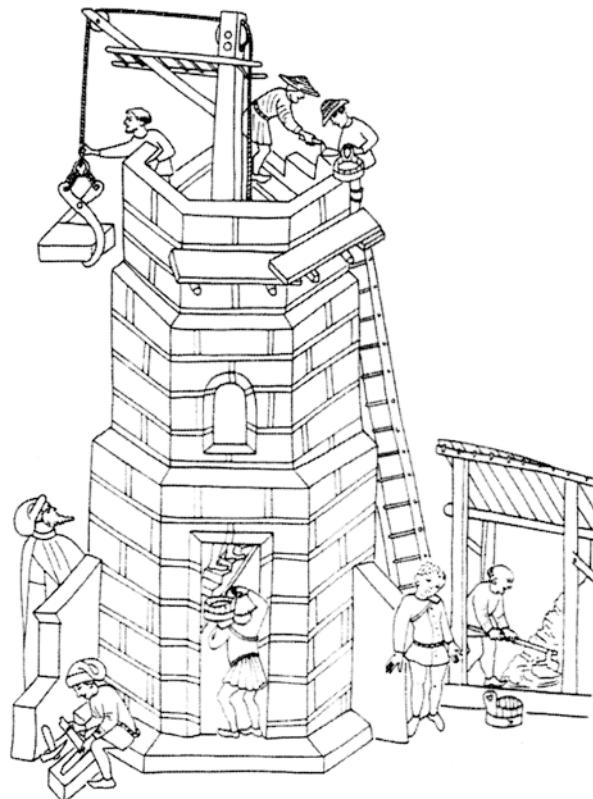
deren Stirnflächen jedoch in sehr erhabener, unbehauener Bosse aus der Wandfläche hervortraten, was eine sehr rauhe Struktur der Wandoberfläche ergab. Manchmal trat anstelle der Bosse ein menschlicher Kopf. Besonders schöne Beispiele dafür stellen die Außenfront der Wehrmauer der Kaiserpfalz Gelnhausen oder die Grundmauern des Schlosses in Büdingen dar (Abb. 2.18, Tab. 2.1).

In der Gotik wurde dem Bauen eine übergeordnete Bedeutung beigemessen. Deshalb stellte man den Bauvorgang häufig in Holzstichen oder in der Tafel-, Wand-, Glas- und Buchmalerei dar. Die Abbildungen zeigen alle Arbeitsgänge, die zum Herstellen einer Mauer notwendig sind: Der Mauervorgang beginnt mit dem Zurichten der Quader und Kontrollieren ihrer Oberfläche durch die Steinmetze. Daneben sieht man Arbeiter, die Mörtel mischen, die Quader auf das Gerüst hinaufziehen, die den Mörtel in Eimern hinauftragen, dann oben solche, die den Mörtel auf der letzten Steinschicht verteilen und schließlich Maurer, welche die Steine im Mörtelbett lotrecht versetzen. Dabei neigen die Darstellungen allesamt zum Verschönern der Vorgänge und zeigen beispielsweise statt unbehauener Bruchsteine durchwegs sorgfältig rechtwinkelig zugerichtete Werksteine. Die dargestellten Maurer errichten fast immer ein isodomes Mauerwerk im Halbsteinverband. Selten

Tab. 2.1 Wandel der Handwerkstechnik bei der Herstellung von Bruchsteinmauerwerk, Datierungshilfe für Mauerwerk insbesondere im Raum Goslar/Harz

Zeit	Steinmaterial	Bearbeitung	Mauertechnik	Mörtel	Architektureile
Bis 1000	Große Lesesteine	Unbearbeitet	Zyklopenhaft	Gipsmörtel sehr fest –	
11. Jahrhundert	Kalksteinquader	Natürliche Bruchfläche oder hammerrechte	Quader verblendet mit Hinterfüllung	Erste Hälfte Gips-, dann sehr fester Kalkmörtel	Sandstein, ab zweite Hälfte auch Buntsandstein, gespitzt und geflächt
12. Jahrhundert	Erste Hälfte: Kalksteinplatten und kleine Kalkbruchstücke; Zweite Hälfte: plattenförmige Kalkbruchsteine im schichtweisen Wechsel mit Spiriferensandstein	Wie vor	Nicht mehr so regelmäßig im Verband. Regelfuge mit ca. 50 cm Höhenabstand	Fester Kalkmörtel	Sandstein geflächt, mit schmalem Kantenschlag
13. Jahrhundert	Spiriferensandstein, meist Lesesteine	Unbearbeitet	Erste Hälfte: Schalenmauerwerk in Fischgrätmuster, Regelfuge mit ca. 50 cm Abstand; Zweite Hälfte: Schichtverband, Regelfuge mit ca. 100 cm Abstand	Fester Kalkmörtel mit grobem Sand	Sandstein geflächt, z. T. mit eingemeißelten Mustern, Kantenschlag ca. 2,5 cm breit. Vereinzelt Zahnhfläche
14. Jahrhundert	Spiriferensandstein gebrochen	Unbearbeitet	Wie vor, vereinzelt zwischen Schalung gepackt	Mittelfester Kalk	Sandstein mit „Zahnspille“ geflächt, sehr schmaler Kantenschlag
15. Jahrhundert	Lesesteine verschiedener geologischer Natur, bevorzugt Spiriferensandstein. Ab 1480 in zunehmendem Maße Sudmerberger Kalksandstein	Unbearbeitet	Zwischen Schalung gepackt Abgespitzt	Schlüchter Mörtel	Sandstein glatt geplilt, schmaler Kantenschlag oder schräg scharriert. Sehr selten auch Architekturglieder aus Sudmerberger Sandstein
Bis 1525	Sandsteinquader	Diagonal oder senkrecht scharriert	Verblendmauerwerk	Magerer Mörtel	Sandstein, fein scharriert

Abb. 2.19 Mittelalterliche Darstellung eines Turmbaus mit folgenden typischen Maurerarbeiten: Quaderoberfläche kontrollieren, Mörtel mischen, Steine mit einem Behelfskran hochziehen, Mörtel schleppen, Quader passgenau versetzen



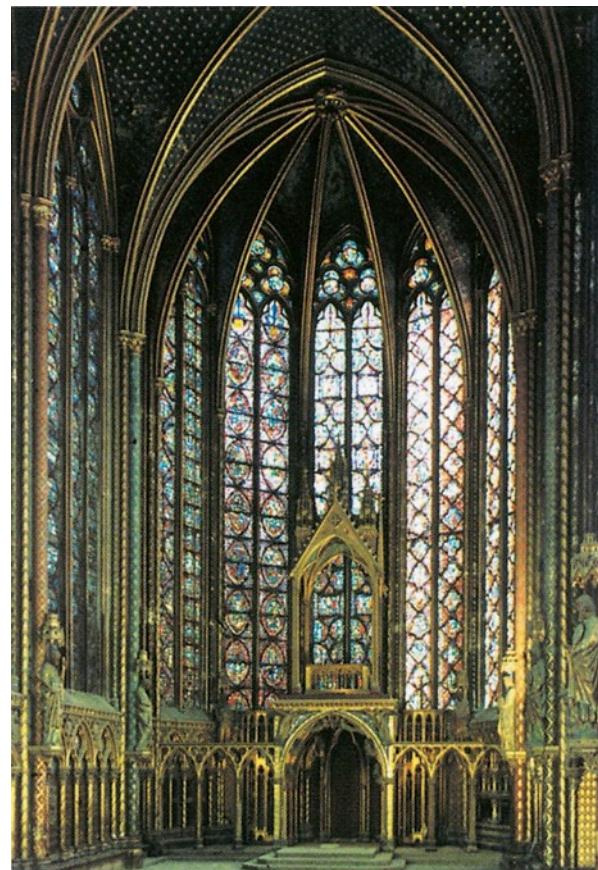
wird das reale Schalenmauerwerk mit seinen verschiedenen großen, behauenen oder gar Bruchsteinen wiedergegeben (Binding und Nussbaum 1978, Abb. 2.19).

In der Baukunst der Gotik entwickelte das Steinmetzhandwerk seine höchste Blüte. Riesige Wandpfeiler trugen mit ihren Diensten hohe gemauerte Gewölbe; die Wand zwischen den Pfeilern diente nur als Füllwand und wurde wo möglich durch spitzbogige Arkaden aufgelöst. Die Füllwände selbst trugen keine Lasten und konnten daher sehr dünn gehalten werden. Sie können in der Tat aus diaphanen, bunt bemalten, leuchtenden Glaswänden gebildet gleichsam bar aller Materie vergeistigt werden (Sedlmeyer 1988, Abb. 2.20).

2.1.7 Neuzeitliches Natursteinmauerwerk

Eine erneute Besinnung auf die römische Antike brachte den Baustil „Renaissance“ hervor. Er beginnt in Italien um 1420 und dominiert in Deutschland im 16. Jahrhundert, wobei er im 17. Jahrhundert manieristische Züge annimmt. Wieder werden die Mauern aus zwei Außenschalen und Füllwerk dazwischen hergestellt. Während die Außenschalen aus sehr genau zugerichteten Werksteinen aus Sand- oder Kalk-

Abb. 2.20 Paris, Sainte Chapelle. Die Außenwände wurden schier in diaphane, leuchtende Glasflächen aufgelöst



stein gebaut wurden, hat der Maurer zumeist das Füllwerk als lose Schüttmasse in den Raum zwischen den Schalen eingefüllt. Ein sehr genaues Quaderwerk errichtete beispielsweise der Baumeister Blasius Berwart am Wasserschloss in Ansbach (Maier 2005b). Seine Fugen sind so eng, dass stellenweise keine Messerspitze eindringen kann. Diese genau gearbeiteten Quader mit ihren Pressfugen finden sich auch an den anderen Schlössern und Burgen der Zeit, z. B. an der Alten Hofhaltung in Bamberg (Burandt 1998, Abb. 2.21).

Eine Besonderheit bringt die Renaissance freilich mit sich: das Mischmauerwerk. Die Außenschale eines Mauerwerks kann jetzt aus Werksteinen, Relief-, Terrakottaplatten oder Sgraffito-Putz und bemaltem glattem Putz bestehen, während die innere Schale und das Füllmauerwerk dagegen zumeist aus Backsteinen errichtet wurden. Es wird also nach außen eine aufwendige Werksteinwand gezeigt oder gar nur vorgetäuscht, während innen drin und auf der inneren Außenseite der Wand wesentlich billigeres Backsteinmaterial zur Anwendung kam (Abb. 2.22).

Andererseits konnte auch Mischmauerwerk gebaut werden, indem bestimmte hervorgehobene Bauteile in der Mauer, beispielsweise der Sockel, die Fensterum-

Abb. 2.21 Ansbach, Residenzschloss. Kellermauerwerk der Renaissance aus sehr genau zugehauenen Quadern



Abb. 2.22 Ansbach, Hofkanzlei. Renaissance-Fassade mit Sgraffito-Putz an der Außenwand, der Quader vortäuschen soll



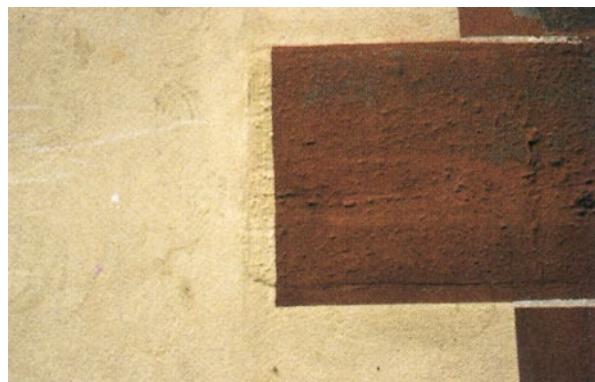
rahmung, die Simse und das Kranzgesims, aus Natursteinen, der Wandfond aber aus Backsteinen hergestellt worden sind. Auch wurden vom Vorgängerbau noch übriggebliebene Natursteinquadern in die neuen barocken Wände eingesetzt (Abb. 2.23).

Die verputzten Wandfonds trugen wiederum eine Quadermalerei, wie sie traditionell seit der Gotik üblich gewesen ist. Während in der Gotik die vorgetäuschten Quadern auf verputztem Werkstein aufgemalt oder einfach aufgeputzt wurden und

Abb. 2.23 Ansbach, Residenzschloss. Barockes Mischmauerwerk aus Backsteinen und Sandsteinquader



Abb. 2.24 Büdingen, Stadtkirche. Der unregelmäßige Eckquader aus Sandstein wurde mit Farbe als großer, genau behauener Quader vorgetäuscht



nen eine Verschönerung des realen Mauerwerks angestrebt wurde, ist die Renaissance auf Täuschung aus. Selbst die Fenstergewände samt Sturz und Sohlbank wurden häufig statt aus realem Werkstein ausschließlich mit malerischen Mitteln erzeugt (Maier 2005b, Abb. 2.24).

In der Baukunst der Renaissance wurde freilich weniger das Mauerwerk, sondern vor allem das Gewölbe und die Kuppel revolutioniert. Es kam dabei zum ersten ingeniermäßigen Bauen (Mislin 1988). Besonders häufig setzten die Architekten dabei den Zuganker in Form eines Holzbalkens oder einer Stahlstange ein. Dadurch wurden die riesigen Kuppeln etwa am Dom zu Florenz oder die am Petersdom in Rom erst möglich.

Nach dem 30-jährigen Krieg wurde zunächst der italienische Barock mit seinen schwelrenden Formen und dann der unter Ludwig XIV. in Versailles entstandene, außen wesentlich nüchternere, französische für Deutschland zum Vorbild. Jetzt wurde das teuere Werksteinmauerwerk weitestgehend aufgegeben und der Backstein trat seinen Siegeslauf an. Doch einzelne Werkstücke einer Barockfassade wurden in der Regel immer noch aus Naturstein angefertigt: Dazu gehörten die Pilaster

Abb. 2.25 Schwäbisch Hall. Steinquadern wurden auf dem Putz mit malerischen Mitteln vorgetäuscht



und Säulen der Blendarchitektur, die Lisenen, die Simse und die Fenster- und Türverdachungen.

Die barocken Baumeister haben aber auch ganze Kirchenfassaden wie etwa Johann Dientzenhofer an der Domkirche in Fulda oder Balthasar Neumann an der Wallfahrtskirche Vierzehnheiligen als solide, zweischalige Natursteinwände errichtet, die allerdings auf ihrer Innenseite verputzt gewesen sind. Außen wurde der Sandstein steinfarbig überfasst, um ein gleichmäßiges Erscheinungsbild der Außenwand abzugeben, die Fugen des Mauerwerks wurden schließlich mit Farbe nachgezogen. Auf solche Weise erzielten sie ein einheitliches, farbiges Fassadenbild (Abb. 2.25).

Die Wohnhauswände jedoch wurden zumeist aus Backsteinmauerwerk oder aus Holzfachwerk mit Backsteingefachen errichtet und mit einem Putz überzogen (s. Kap. 4.3). Lediglich der Fachwerksockel oder das Erdgeschoss konnten aus Werksteinen errichtet worden sein (Abb. 2.26).

Mit dem Ende der Feudalzeit kam der Klassizismus als erneute Hinwendung an die Baukunst der Antike auf. Jetzt kam die Werksteinmauer zu neuer Blüte. Das Brandenburger Tor am Pariser Platz in Berlin von Carl Gotthard Langhans zeigt wieder hohe Steinmetzkunst am Mauerwerk nach altgriechischem Vorbild, ebenso der Reichstag von Paul Wallot.

Im Verlauf des 19. Jahrhunderts jedoch griffen die Architekten auf die alten Baustile wie auf Versatzstücke zurück und errichteten Gebäude im jeweiligen Neo-Stil. Wenn ein Gebäude in Neugotik errichtet werden sollte, so blendete man dem Backsteinmauerwerk gotisierende Werksteinstücke auf, sollte es in Neo-Renaissance wirken, dann vermischt man Werksteine und Backsteine in Kopie der Mauertechnik der Renaissance; ebenso imitierend verfuhr man bei der Verwendung des Neo-Barock und errichtete die Mauern aus anschließend verputzten Backsteinen. Das entscheidend Neue war allerdings, dass unter der neo-stilistischen Außenschale bereits ein ingenieurmäßig berechnetes Traggerüst zumeist aus Gusseisen oder Stahl angeordnet wurde. Der Stilbegriff war letztlich als eine bloß „schmückende“

Abb. 2.26 Erlangen, Apfelstr. 2. Barockes Wohn- und Geschäftshaus aus dem Jahre 1699 mit verputzten Backsteinwänden und Sandsteinquadern am Tor im Erdgeschoss, verputztes Fachwerk in den Obergeschossen



Hülle anzusehen, mit der man fallweise das Bauskelett bekleidete“ (Benevolo 1988, Abb. 2.27).

In diesem Jahrhundert veränderten sich die Mauerwerkstechniken revolutionär: Mit den jetzt industriell hergestellten Baustoffen wie hochgebrannte Mauerziegel, Portlandzement, Stahlträger und schließlich Beton erreichte der Bauingenieur eine völlig neue, bisher unbekannte Dimension der Tragfähigkeit des Mauerwerks, die eine ungeahnte Steigerung der Gebäudehöhen und Spannweiten zuließ. Anstatt Naturstein wurde nun der neue, aus Beton hergestellte Kunstwerkstein eingesetzt: Die ersten deutschen Zementwaren- und Kunststeinfabriken wurden in den vierziger Jahren des 19. Jahrhunderts in Süddeutschland gegründet, und zwar ging die Bewegung besonders von der Donaustadt Ulm aus (Petry 1913). Damals wurden Mischungen von Romanzement und Portlandzement verarbeitet, 1845 wurden die ersten Kunststeintreppen in Berlin hergestellt. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts begannen die Kunststeinhersteller, die nunmehr auch mit Eisen armierten Betonwerksteine genauso wie Natursteine zu bearbeiten. Jetzt entstanden Fassaden anstatt aus Natur- aus Betonwerksteinen, oft vermischt mit Klinkern und verputzten Oberflächen (Abb. 2.28).

Das tragende Mauerwerk wurde in ein Stahlbetonskelett aufgelöst und war nur noch Füllwand wie einst in der Gotik. Die hohe Kunst des Werksteinmauerwerks wich im 20. Jahrhundert dem Belag aus vorgehängten, dünnen Natursteinplatten



Abb. 2.27 London, King's Cross Station. Farbige Lithographie, Mitte des 19. Jahrhunderts. Die historisierende Fassade des Bahnhofs verhüllt die Gusseisenkonstruktion des Gebäudes

Abb. 2.28 Leipzig, Harnackstraße. Betonwerksteine in der Backsteinaußenwand



Abb. 2.29 Nürnberg, Kongresshalle. Granitplatten als Verkleidung der Backsteinaußenwände



auf Backsteinmauern, wie etwa die Granitplatten an der Kongresshalle in Nürnberg oder Wänden aus vorgefertigten Platten aus Beton (Abb. 2.29).

Das Mauerwerk aus natürlichen Werksteinen wurde zur Rarität und fand sich nur noch an Bauten besonderen Anspruchs wie z. B. an der St. Heinrichskirche in Bamberg (Laible 2003). Mitte des 20. Jahrhunderts gab es kaum noch Maurer, die eine zweischalige Werksteinmauer errichten konnten. So erreichte die am 13. August 1961 gebaute Mauer aus Betonfertigteilen in Berlin eine traurige Berühmtheit. Erst die Postulate der Denkmalpflege zwangen junge Maurer, wieder die Techniken des Natursteinmauerwerks zu erlernen (Abb. 2.30).

2.1.8 Dekor an Natursteinwänden

Die Außenschalen einer gemauerten Wand zeigten bereits bei den Römern zumeist dekorative Schauseiten. Die Fassaden wurden – wie bereits dargestellt – häufig aus einfachen Bruchsteinen errichtet und mit Kalkputz verputzt. Außerdem bildete der Verputz eine ideale Fläche, auf der dekorative, großformatige Natursteine vortäuschende Zierfugen aufgemalt werden konnten.

Offnungen wie Fenster oder Türen im mehrschaligen Natursteinmauerwerk benötigten stets eine ringsum laufende Fassung, die aus Gewändesteinen rechts und links, aus dem Sturz oben und der Schwelle oder Sohlbank unten bestanden. Würden sie fehlen, könnte die innere Füllmasse nach Auswaschen der Bindekraft des Kalkmörtels einfach heraus rieseln. Solche Umfassungssteine sind in der Antike häufig reich verziert worden. Schon am Löwentor in Mykene (Abb. 2.3) wurde diese Technik angewendet. Die römischen Baumeister gaben den Sturzsteinen sog. „Ohren“, d. h. Auskragungen an ihrem Ende, mit denen sie über die seitlichen Gewändesteine hinausragten. Oft wurden Stürze auch durch gerade, dreieckige oder segmentbogige Verdachungen überragt, denen im Mauerwerk selbst Entlastungsbögen entsprachen. Die dadurch über den Stürzen gleichsam vor den unbelasteten

Abb. 2.30 Berlin, Grenzmauer. Die Stadt wurde 40 Jahre lang durch eine Mauer aus Betonfertigteilen geteilt. Sie fiel am 9.11.1989



Bereichen unter den Entlastungsbögen entstandene Auszugsfläche bot – wie einst am Löwentor – die Gelegenheit, reichen Dekor wie Waffengebinde, Trophäen oder Brustbilder von Gottheiten, aber auch Reliefs und Mosaike mit Darstellungen von Allegorien und Symbolen über der Öffnung anzubringen. In ähnlicher Weise wurde die Oberfläche der Gewändesteine verziert oder durch Abstufung in zumeist drei flache Schichten, sog. „*Faszien*“, gegliedert. An den Rändern solcher Abstufungen entlang begannen bereits die Griechen typische Dekorationen wie Perlstäbe, Eierstäbe und Kymatien anzubringen (Binding 1987, Abb. 2.32).

Die reguläre Gebäudeaußenwand schloss oben unter der Traufe mit dem Haupt- oder Kranzgesims ab. Gesimse gliederten außerdem die Außenwand häufig auch noch geschossweise. Die Gesimssteine wiesen wiederum einen sehr typischen Zierrat auf: Sie bestanden in der Regel aus einem mehrfach abgestuften Balken, dem sog. „*Architrav*“, auf dem oben ein mit Blütenranken, Waffen oder figürlichen Szenen verzieter Fries saß, darüber war ein „*Sima*“, geschmückt mit Profilen bestehend aus Zahnschnitt, Karnies, Eier- bzw. Perlstab und Palmetten- bzw. Lotus-Palmettenfries, angeordnet. Ein solcher Dekor überzieht oft in überreicher Fülle insbesondere das gesamte Kranzgesims (Abb. 2.31).

Abb. 2.31 Rom, Basilica Aemilia. Gebälk, bestehend aus dreifach gegliederten Architrav, mit Ranken verziertem Fries und oben das Sima des Kranzgesimses



Abb. 2.32 La Turbie, Tropaeum Alpium, Eingang umrahmt mit Architekturgliedern wie seitlichem Gewände, auskragendem Sturz, Auszugsfläche und einer Dreiecksverdachung



Große Außenwandflächen wurden zumeist durch eine vorgelegte Blendarchitektur gegliedert und somit scheinbar in Arkaden- und Pfeilergeschosse aufgelöst. Die Blendarchitektur bestand zumeist aus senkrechten Halbsäulen, Pilastern und Lisenen, denen waagerecht Gesimse aufgelegt wurden. Die senkrechten Trageglieder standen unten auf abgestuften Basen und trugen oben Kapitelle, nämlich das dorische oder tuskische im unteren, darüber das ionische und dann das korinthische Kapitell im nächst höheren, vorgeblendeten Geschoss. Gerade die Blend-

Abb. 2.33 Würzburg, Frauenkirche. Gotisches Portal mit Architekturedekoration. Die Quader am rechten Stützpfeiler wurden überfasst und dadurch vergrößert und geschönt



architektur als ein dekoratives und zugleich gliederndes Element vor einer großen Außenwand wie sie das „*Colosseum*“ in Rom oder die „*Porta Nigra*“ in Trier zeigt, hat sich in der europäischen Baukunst bis ins 19. Jahrhundert hinein erhalten (Binding 1987).

Im Mittelalter entstanden zunächst die Zierrate der Romanik, seit dem Hochmittelalter die der Gotik. Wieder setzte man senkrechte Lisenen und waagerechte Gesimse als Gliederungselemente ein, die zugleich auch als Wanddekor dienten. Unter den zumeist glatten Gesimsbändern ordnete der mittelalterliche Baumeister Friese an, etwa den Deutschen Fries, den Bogenfries, den Mäanderfries, den Flechtbandfries, den Rautenfries und viele andere mehr (Binding 1987). Den oberen Abschluss der aufgeblendeten Pilaster, Lisenen oder Dienste bildeten oft vegetabilische Kapitelle, häufig mit angsterregenden Fratzen geschmückt, während sie unten stets auf ebenfalls der Mauer aufgeblendeten Sockeln oder Basen standen. In der Romanik wurden aber auch einfache Würfelkapitelle verwendet, während der Bildhauer in der Gotik eine Fülle von insbesondere vegetabilischem Beiwerk vor die Außenwände der Kirchen blendete (Abb. 2.33).

In der Renaissance griff man die Dekorelemente der Antike wieder auf, reicherte sie aber mit neuen Komponenten an, beispielsweise mit von Blättern kreuzweise umwundenen Girlanden, mit Bandel- und Rollwerk. Ein besonders charakteristisches Gliederungselement stellte in dieser Zeit die Nische dar. Es handelt sich um eine in die Mauerfläche eingefügte, im Grundriss halbrunde, segmentbogenförmige oder rechteckige Vertiefung. Als vor allem an der Innenwand entwickeltes, antikes Element, wie es sich besonders durchdacht etwa am „*Pantheon*“ in Rom zeigt, das in seiner heutigen Baugestalt im Jahr 118 n. Chr. von Kaiser Hadrian eingeweiht wurde (Wohlmayr 2011), diente die Nische am Außenbau entweder als Standplatz für Figuren oder zur Aufnahme von Fenstern und Portalen oder sie blieb einfach leer (Abb. 2.34).

Diese dekorativen Gestaltungsglieder der Natursteinwände waren auch späterhin im Barock im Gebrauch, wenn auch die Natursteinwand selbst der Backsteinwand weichen musste. Der Architekt gliederte die Fassaden mehrgeschossiger Schloss-

Abb. 2.34 Rom, Pantheon. Der Innenraum besitzt eine Nischengliederung der aus Gussmörtel mit Travertin- und Tuffbruchstücken gegossenen Außenwände

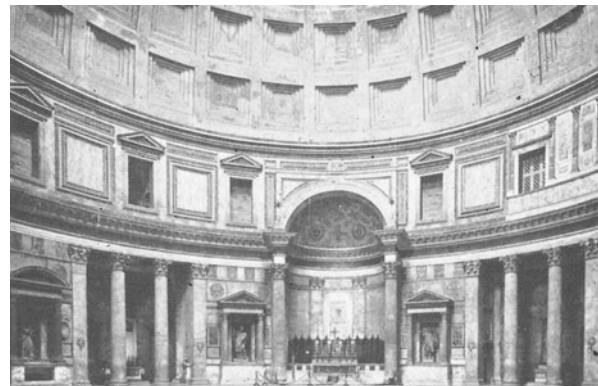


Abb. 2.35 Ansbach, Residenzschloss. Hochbarocke Innenhoffassaden mit stockwerksweise angeordneter Blendarchitektur



gebäude mit Blendarchitekturen. Dabei setzte er wiederum die antiken Kapitellformen in der Regel aus Natursteinen übereinander: im Erdgeschoss das damals auch römisch genannte dorische, im Piano nobile das ionische und schließlich im 2. Obergeschoss das korinthische Kapitell. Die barocken Innenhoffassaden des Ansbacher Schlosses zeigen diese geschossweise Gliederung (Maier 2005b, Abb. 2.35).

Die Dekorationen der Antike wurden ein weiteres Mal im Klassizismus aufgegriffen und im klassischen, antiken Sinne angewendet. Historische Versatzstücke dekorierten auch die Neo-Stile des 19. Jahrhunderts. Die Neue Sachlichkeit des 20. Jahrhunderts verzichtete freilich auf die dekorative Baukunst, deren Architekten entwickelten allenfalls die sog. „Kunst am Bau“.

2.2 Backsteinmauerwerk

Vom Backstein geht eine Faszination aus, die diesen Baustoff zu allen Zeiten beliebt gemacht hat. Der Baustein war einfach herzustellen: Tonerde wurde in einen Holzkasten eingebracht und an seiner Oberfläche mit der Hand waagerecht abgestri-

chen. In der ältesten Zeit wurde der auf diese einfache Weise rechteckig geformte Mauerziegel anschließend luftgetrocknet, in der jüngeren im Brennofen gebrannt. Obwohl das Bauen mit dem handlichen Mauerziegel bereits eine Tradition von mehr als 5.000 Jahren hat und schon die ersten Kulturen der Menschheit sich mit diesem Material einen gebauten Rahmen gegeben haben, blieb der Backstein ewig jung. Anfangs war der Mauerziegel eine Revolution, heute ist er ein nicht mehr hinwegzudenkender Bestandteil unserer gebauten Umwelt. Mit ihm sind äußerst gegensätzliche Baugedanken vereinigt: Ältestes und Neuestes, Rationalität und Romantik, Handlichkeit und Monumentalität, Normierung und künstlerisch freie Gestaltung. Der Backstein besitzt im Gegensatz zum Naturstein die Eigenschaft, als kleinste Einheit eines Maßsystems, eines Rasters zu fungieren, und dennoch spricht er die menschlichen Sinne an durch Farbigkeit und Schattierungsreichtum, durch Greifbarkeit für das Auge, durch Tastbarkeit seiner Oberfläche und durch das ihm innenwohnende Vermögen, mit ihm als Formstein fast jede künstlerische Absicht in die Tat umsetzen zu können (Hoffmann-Axthelm 1986).

Beim Backstein handelt es sich um eine Erfindung Mesopotamiens (Jakob-Rost 1987), an uns überkommen durch römisches Erbe. Vitruv widmete das dritte Kapitel seines zweiten Buches den Ziegeln (Fensterbusch und Vitruv 1976). Er berichtete allerdings nur über handgestrichene, an der Luft getrocknete Ziegelsteine, sog. „*Luftziegel*“, die gewöhnlich zwei Jahre lagern mussten, ehe sie vermauert werden konnten. Er beklagte das große Schwinden bzw. „*Schrumpfen*“ dieser Steine. Die große Zeit der gebrannten Ziegel „*lateres coctiles*“ begann erst im 2. Jahrhundert n. Chr. und dominierte schließlich das Bauwesen in der Spätantike.

Die Römer dachten stets rational, nutzten infolgedessen die dem Backstein innerwohnende Rationalität, erkannten aber auch seine Begrenztheit und überwanden sie auf geniale Weise. Da sie mit Backsteinen keine waagerechten Decken oder Stürze bilden konnten, entwickelten sie eine beeindruckende Gewölbetechnik. Weil der Backstein der Wand stets im Verband vermauert werden musste, erlaubte er für das Entwerfen eines Gebäudegrundrisses keine Beliebigkeit. Die Steinmaße wurden deshalb gleichsam als normiertes Modul am jeweiligen Bau eingesetzt. Mit ihm errichteten überragende Baumeister (Donderer 1996) gewaltige Wände.

Sie setzten sich zumeist aus rhythmisch wechselnden, pfeilerartigen Backsteinmassen und geformten Wandnischen zusammen. Mit dieser „*Spundwand*“-Konstruktion der Mauern wurde ihre Tragfähigkeit derart erhöht, dass sie auch den gewaltigen Schub weite Räume überspannender Gewölbe standzuhalten vermochten. Andererseits stellten die römischen Legionäre jede Art von Formziegeln (Durm 1910b) her: rechteckige und quadratische Mauerziegel, langgezogene und quadratische Hohl- und Vollziegel für die Hypokaustenheizung, Rundziegel, Dreiecksziegel, Bogensteine, Keilsteine, aber auch Deckenplatten, Bodenplatten, Wandkacheln und selbstverständlich auch Leistenziegel für die Dachdeckung (Abb. 2.36).

Die römischen Ziegler brannten die rechteckigen oder mitunter auch quadratischen Vollziegel als Mauerziegel von unterschiedlicher Länge und Breite, etwa in Trier in Längen von 34–60 cm, in Breiten von 28–60 cm und in von 4–6 cm schwankenden Dicken. Die Ziegel wurden mit Ziegelstempeln (Rieckhoff-Pauli

Abb. 2.36 Regensburg, Museum. Modell eines römischen Zimmers mit verschiedenen Formziegeln



und Castra 1979) oder mit der Inschrift des jeweiligen Ziegelherstellers versehen (Bechert 1982).

Die römischen Maurer vermauerten die Backsteine im Halbsteinverband in Kalkmörtel mit zwischen 1,5–4 cm dicken Lagerfugen. Sie errichteten das Backsteinmauerwerk zumeist ab einer Dicke von 2 Schuh=etwa 60 cm in der gleichen zweischaligen Mauerweise wie das Natursteinmauerwerk. Allerdings banden die Mauerziegel häufig als Durchschuss durch die Mauerstärke hindurch, um die Standfestigkeit zu erhöhen. Auch wurden oft mehrere Ziegelschichten im Verband gänzlich durchgemauert, so dass die mittlere Füllschüttung entfiel. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass reine Backsteinwände „*ohne Beiziehung eines anderen Materials*“ (Durm 1910b) im römischen Weltreich äußerst selten vorkommen. Lediglich die spätantike „*Basilika*“ in Trier ist ein ganz reiner Backsteinbau großen Stils, „*wie er von den Alpen bis zum Aetna nicht wieder gefunden wird*“ (Durm 1910b, Abb. 2.37).

Mit diesem römischen Erbe sah sich das europäische Mittelalter konfrontiert. Der Einsatz von Mauerziegeln begann in der Zeit Karls des Großen, allerdings zunächst offenbar vor allem an Klosterbauten, z. B. an der Klosterkirche Korneliusmünster bei Aachen (Böker 1988). Für die großen staatlichen Gebäude der Ottonen, Salier und Staufer, etwa die Kaiserpfalzen und die großen Kaiserdoms, war die

Abb. 2.37 Trier, Römische Basilika, erbaut 310 n. Chr., modern wieder aufgebaut. Reiner Backsteinbau aus gebrannten Mauerziegeln



Werksteinmauer verbindlich. In Norddeutschland allerdings benutzten die Maurer wegen des fehlenden Natursteins schon anfangs des 12. Jahrhunderts beim Kirchenbau zunächst keinen unregelmäßigen Bruchstein oder zum großen Quader zugehauenen Werkstein, sondern hauptsächlich aus dem Rheinland eingeführte, kleinformatige Tuffsteine, die also über weite Strecken transportiert werden mussten und deshalb entsprechend kostspielig waren. Infolgedessen wandten sie sich Anfang des Jahrhunderts dem aus Ton gebrannten Backstein zu.

Die Ablösung des Natursteins durch den Backstein fand in ganz Norddeutschland und auch in anderen Landschaften im mittleren 12. Jahrhundert ihre Verbreitung. So sind zunächst die Rheinländer selbst zu nennen: eine Schlüsselrolle bei der Genese der Backsteinarchitektur fällt dabei dem Dom zu Speyer zu: Backsteine mit dem Format 30–32 cm × 16 cm × 5 cm sind mit Kleinquaderwerk und Tuff in den Rundbogenfriesen der Seitenschiffmauern und im Laufgangsgewölbe des östlichen Vierungsturms gemeinsam vermauert (Böker 1988). Aber auch in anderen Regionen wie etwa im bayerischen Backsteingebiet z. B. am Dom zu Freising, an der Frauenkirche und an St. Peter in München lässt sich der Übergang von Tuffstein zu Backstein nachweisen. Deutlich erkennt man schließlich in ganz Deutschland eine Experimentierphase, in der noch nach den handwerklich günstigeren Dimensionierungen des Backsteinmaterials gesucht wurde. Im Fortgang der Entwicklung kommt aber zweifelsohne der norddeutschen Tiefebene an Nord- und Ostseeküste entlang die herausragende Stellung zu. Die Steine der ersten norddeutschen Backstein-Bauten sind 25–26 cm lang, 9,5–10 cm breit und 5–7 cm stark. Gegen 1200 steigerten sich diese Maße auf 26–29 cm Länge, 12–14 cm Breite und 8–9,5 cm Stärke (Tab. 2.2). Gelegentlich, so an den Keilsteinen der Bogenwölbungen finden sich auch abweichende Steinmaße. Im Spätmittelalter vergrößerte man die Steine weiter auf 27–31 cm Länge, 14–16 cm Breite und 9,5–11 cm Stärke (Böker 1988, Abb. 2.38).

Die älteren Zeiten haben die rote Farbe der Backsteine bevorzugt, gelbliche Töne seltener benutzt, dabei jederzeit schreiende Farben vermieden. Im Mittelalter

Tab. 2.2 Mittelalterliche BacksteinformateKlosterformat *vor Ort gemessenes Maß* gemittelt: 28,5 cm × 13,5 cm × 8,5 cm¹

Gebäude	Bauzeit	Länge (cm)	Breite (cm)	Dicke (cm)
Speyer, Dom	Vor 1150	30–32	16	5
Bad Segeberg, St. Marien	Um 1150	28–29	13–13,5	8,5–9
Schleswig, Dom	Um 1180	25–26,5	12,3–13,6	6,8–8,2
Lübeck, Dom (<i>gemitteltes Maß</i>)	Um 1220	29	14	10
Lübeck, Heilig-Geist-Spital (<i>gemitteltes Maß</i>)	1285	28	13,5	9
Jesenwang/Oberbayern, Pfarrkirche	1414	35–37	17–18	6,5–7,5
Stendal, Dom	1423	26	12	7,4–9
Nürnberg, Mauthalle (<i>eingemeißeltes Maß</i>)	1498	30	14	
Lübeck, Mengstraße 64 (<i>gemitteltes Maß</i>)	1544	28	13,5	8
Pegau/Sachsen, Alte Polizei	1559	29	12	8,5
Bamberg, Kutschenremise, Westgiebel	1648	28–30	13–14	6–7

¹ Schuhmacher (1985), S. 99 setzt sich mit dem „Klosterformat“ auseinander und gibt diese Maße als Mittelwert für das Klosterformat

Abb. 2.38 Die aus Backsteinen errichteten Türme der Frauenkirche in München



scheut die Baumeister nicht die Belebung der Flächen durch die Abwechslung der im Brand erzeugten helleren und tieferen Töne vom hellen Fleischrot bis zu einzelnen schwärzlich verfinserten Steinen hin. Daneben wurden solche verfinserten Steine auch wohl als Ersatz von Glasuren zu regelrechten Musterungen der Flächen benutzt. Zum Teil wurden die Backsteine nach der Vermauerung noch rot überstrichen. Die Oberfläche der Steine zeigt im allgemeinen die durch die Handstrichtechnik bedingte raue Körnigkeit (Finke et al. 1989).

Seit dem 14. Jahrhundert werden mancherorts Ziegelstempel verwendet, z. B. in Lüneburg, Lübeck, auf Fehmarn, in der Mark Brandenburg (Tangermünde). Ob es sich bei den eingeprägten Zeichen um den Steinmetzzeichen entsprechende Urhebermarken handelt, ist noch nicht genügend untersucht worden, nur die Lübecker Marken sind eindeutig Ziegeleistempel (Abb. 2.39).

Abb. 2.39 Burg auf Fehmarn, Kirche. Mauerwerk mit Urhebermarken



2.2.1 Mittelalterliche Mauerverbände

Der Maurer arbeitete bei Mauerdicken, die größer als eine Steinlänge waren, von außen nach innen. Reines Schalenmauerwerk mit gegossenem Kern, wie es beim Naturstein die Regel war, kommt nur in der Frühzeit des mittelalterlichen Backsteinbaus vor. Hier erweist sich wiederum der genetische Zusammenhang des Backsteinmauerwerks mit dem Natursteinbau.

Große Mauermassen bestehen meistens aus Füllmauerwerk, also aus Steinen minderer Qualität und Backsteinbruchstücken, und einer 1/2 Stein starken vorgesetzten Verblendschicht von Läufern, die durch tiefer hinein greifende Steine, die diagonal versetzten Binder, mit dem Füllmauerwerk verankert wird. Seltener und wohl nur in romanischer Zeit ist das Mauerwerk aus Ziegeln geschichtet und zwar abweichend von heutiger Arbeitsweise dergestalt, dass sozusagen eine beliebige Anzahl von 1/2 Stein starken Wänden hintereinander gestellt und wieder durch Binder miteinander verankert sind. Beide Ausführungsweisen, die Verblendschicht genauso wie die hintereinander gesetzten Wände, geben volle Freiheit für die Abwechslung von Läufern und Bindern.

Der eigentliche Backsteinverband war abhängig von der Mauerdicke. Mauern mit der Dicke einer Steinbreite, was ungefähr einer halben Steinlänge entsprach, wurden im Läuferverband, Mauern mit der einer ganzen Steinlänge zumeist im Binderverband gemauert. Dabei verstand der Maurer unter Läufer die an der Wand sichtbare lange Seite des Steins und unter Binder die sichtbare Kopfseite. Wurden die Steine hochkant vermauert, sprach man von einer Rollschicht. Die Festigkeit des Verbands entstand immer dadurch, dass senkrecht durch mehrere Schichten hindurchgehende Stoßfugen im gesamten Mauerkörper vermieden wurden.

Im Mittelalter haben wir es meist mit dem „märkischen“ oder mit dem „Klosterverband“ zu tun. Besonders sorgfältig ausgeführt findet er sich an der Südseite der Heilig-Geist-Kirche in Lübeck. Dabei folgen in jeder Backsteinschicht auf einen Binder zwei oder seltener drei Läufer. Läufer und Binder wechseln also in jeder Schicht unregelmäßig miteinander ab. Der Läufer liegt in der Regel mittig über dem Binder der unteren Schicht und steht also beiderseits mit je einem Viertel seiner

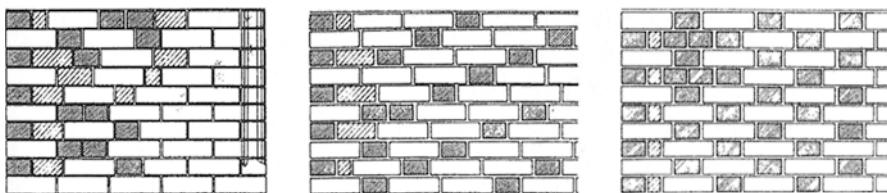


Abb. 2.40 Mittelalterliche Mauerverbände: *links*: Wilder Verband, *mitte*: Gotischer Verband, *rechts*: wendischer Verband

Länge über ihn über. Dadurch wird die tragfähige Viertelsteindeckung erreicht und es entsteht eine enge, sehr haltbare Verzahnung der Steine.

Lässt der Maurer entweder nach je einem Läufer einen Binder folgen, entsteht der sogenannte „gotische“ oder „polnische“ Verband oder folgen nach je einem Läufer zwei Binder, formt er den sogenannten „märkischen“ Verband. Die Bezeichnungen sind zwar geschichtlich völlig unbegründet, jedoch handwerklich eingewurzelt. Bei beiden Verbänden bilden sich in der Fläche durch die immer gleiche Folge der Stoßfugen leicht zusammenhängende große Linien zum Schaden der einheitlichen Flächenwirkung. Um sie zu vermeiden, wechselt man besonders in spätgotischer Zeit gern mit beiden Folgen in der gleichen Schicht ab, schaltet wohl auch stellenweise noch mehr Läufer ein, um eine unregelmäßige Verteilung der Stoßfugen und dadurch eine ruhigere Flächenwirkung zu erzielen. Der Wechselverband findet sich beispielsweise an der Kreuzgang-Außenseite des St. Annenklosters in Lübeck (Kruse 1986, Abb. 2.40).

Verbandsregeln des mittelalterlichen Backsteinmauerwerks

- *Mauerkanten und Ecken fangen stets mit ganzen Backsteinen an:* Bis zum Ende des 19. Jahrhunderts wurde die Mauerecke mit ganzen Steinen aufgesetzt, mit dem Aufkommen des Reichsformats fast nur noch mit Dreiviertelsteinen.
- *Der Maueranfang beginnt in jeder Schicht regellos mit einem Dreiviertel- oder einem Viertelstein.* Der Wechsel von der durch den Maueranfang entstandenen Halbsteindeckung zur tragfähigen Viertelsteindeckung erfolgte völlig wahllos ohne eine Regel einzuhalten.
- *Die Binder liegen zumeist nicht über der Stoßfuge der jeweils unteren Schicht, sondern über dem Läufer,* im Gegensatz zum modernen Blockverband, wo die Binder auch unter und über der Stoßfuge liegen.
- *Die Binder können in der Ansicht drei verschiedene Muster bilden:* ein senkrechtes Streifenmuster, ein Zickzackmuster und ein -Diagonalmuster.
- *Zwischen zwei nicht allzu weit entfernten Öffnungen im Mauerwerk treten keine Binder auf.* Die Einbindung erfolgt vielmehr durch den Rücksprung des Anschlages.
- *Stockwerksabsätze* lassen sich sehr häufig durch vorkragende oder mauerbündig liegende Binder oder Läuferreihen erkennen.

2.2.2 Mittelalterliche Backsteinformate

Leider gibt es noch keinen historischen Backsteinatlas für Deutschland, wie er für die Natursteine längst schon existiert (Grimm 1990). Mittelalterliche Backsteinformate, die wegen ihrer frühen Verwendung in Klöstern von der Bauforschung als „*Klosterformate*“ bezeichnet werden, wurden in Tab. 2.2 beispielhaft aufgezählt. (Kruse 1986; Maier 1991b)

Wie aus Tab. 2.2 zu ersehen pendeln die Längenmaße mittelalterlicher Backsteine zwischen 25 und 37 cm, am häufigsten wurden allerdings Maße zwischen 28 und 30 cm gemessen. Dieses Maß in cm nähert sich fast immer dem historischen Fuß oder Schuh. Es wäre längst überfällig zu prüfen, ob nicht die Backsteinlänge zugleich das für das gesamte Bauwerk geltende Modul darstellt. Die Breite der Steine ermittelt sich ungefähr aus der Hälfte der Länge und schwankt deshalb zwischen 12 und 18 cm. Die Steindicke bewegt sich zwischen 5 und 10 cm und resultiert zumeist aus einem Drittel bis zu einem Viertel der Länge.

2.2.3 Mauerverbände in der frühen Neuzeit

Ab der Mitte des 16. Jahrhunderts setzen sich immer häufiger neuzeitliche Mauerverbände wie „*Kreuz- und Blockverband*“ durch. Sie zeigen jeweils abwechselnd in der einen Backsteinschicht fortlaufend Binder, in der nächsten darüber Läufer und so fort. Während beim Blockverband die Binder und Läufer in jeder Schicht allerdings um einen Viertelstein versetzt genau gleich übereinander liegen, verspringen die Läufer beim Kreuzverband in jeder zweiten Schicht abwechselnd um eine halbe Backsteinlänge. Auf diese Weise entsteht in je drei Schichten in der Wandfläche ein gemauertes Kreuz (Opderbecke 1910).

Im 17. Jahrhundert kommt der „*Holländische oder Flämische Verband*“ in den Hohenzollerschen Landen auf, wie etwa im Holländischen Viertel in Potsdam (Mielke 1972). Die Binderschichten entsprechen zwar den vorgenannten Verbänden, in den Läuferschichten aber wechseln sich jetzt je ein Läufer und ein Binder ab. Noch jünger sind der „*Amerikanische Verband*“, bei dem auf drei oder mehr Läuferschichten eine Binderschicht folgt, und der „*Wilde Verband*“, bei dem die Binder unregelmäßig in jeder Schicht zwischen die Läufer gestreut sind.

2.2.4 Neuzeitliche Backsteinformate

Die Backsteinformate des 16., 17. und 18. Jahrhunderts blieben in der Regel dem Klosterformat verpflichtet, nahmen aber an Dicke zusehends ab. Im Durchschnitt handelt es sich um Größen von $28\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 9\text{ cm}$ bis zu $30\text{ cm} \times 14\text{ cm} \times 10\text{ cm}$, die Höhe kann in Einzelfällen auch bis zu 12,5 cm betragen (Tab. 2.3). Die Fugen waren üblicherweise 1,5 cm dick. Die deutsche Renaissance arbeitet zunächst mit dem mittelalterlichen Format weiter, gelangt dann am Übergang zur Barockzeit allmählich zu

Tab. 2.3 Neuzeitliche Backsteinformate

Neuzeitliche Formate vor Ort gemessene bzw. der Literatur entnommene Maße				
Gebäude	Bauzeit	Länge (cm)	Breite (cm)	Dicke (cm)
Backsteine der Renaissance ¹	17. Jh.	27	16	8
Königreich Niederlande (Holland) ²	Ab 17. Jh.	20	10	4
Königreich Preußen ³	Ab 1701	20	10	4
Bamberg, Kutschenremise, Südostecke	18. Jh.	27	14	7
Lübeck, Mengstraße 64, hochbarock	18. Jh.	27	13	7
Alt-badisches Format	19. Jh.	27	13	6
Alt-Hamburger Format	19. Jh.	22	10,5	6,5
Altes Oldenburger Format	19. Jh.	22	10,5	5,2
Bayerisch Königstein	19. Jh.	29	14	6,5
Alt-Österreichisches Format	19. Jh.	29	14	6,5
Reichsformat (Deutsches Reich)	Ab 1871	25	12	6,5
Normalformat DIN 105	Ab 1952	24	11,5	7,1

¹ Schuhmacher (1985), S. 97: Er zitiert Albrecht Haupt und übernimmt dessen Maße

² Das holländische Format entspricht dem preußischen, da unter Friedrich dem Großen in Preußen gerne die holländische Bauweise kopiert wurde (Mielke 1972)

³ Kruse (1986), S. 66

wesentlich kleineren Maßen, das heutige Normalformat = 24 cm × 11,5 cm × 7,1 cm gleichen oder nahe stehen. Außerdem wuchs die Tendenz zur Normierung.

In den nun aufkommenden Territorialfürstentümern war die Herstellung von Mauerziegeln ein fürstliches Privileg. Auch die Reichsstädte erschlossen ihre eigenen Lehmgruben und organisierten die Backsteinherstellung in städtischer Regie. Vor allem um die herrschaftlichen Wälder zu schonen, protegierten Reichsstädte wie Fürst den Backsteinbau. Sie ließen in ihren herrschaftlichen Ziegeleien Backsteine mit Hilfe einer großen Anzahl Ziegeln nach dem Manufakturprinzip herstellen und zwangen die Bauwilligen, die herrschaftlichen Ziegel beim Hausbau überall im Herrschaftsgebiet zu verwenden. Da in jedem Territorium andere Werkschuhmaße vorgeschrieben waren, wurden selbstverständlich auch die Backsteinformate den örtlichen Schuhmaßen angepasst. Die Backsteinformate wurden verbindlich festgelegt, Verstöße dagegen mit harten Strafen geahndet. Der Markgraf von Ansbach ließ seine Ziegelei Backsteine mit den Maßen 32 cm × 14 cm × 6 cm herstellen (Maier 1987). An der 1498–1502 in Nürnberg als Kornhaus von Hans Behaim d. Ä. errichteten Mauthalle wurden in die Sandsteinaußenwände des Erdgeschosses an der südöstlichen Hausecke für alle gut sichtbar die für das Gebiet der Reichsstadt verbindlichen Backstein- und Dachziegelmaße eingemeißelt (Abb. 2.41).

Die Länge neuzeitlicher historischer Backsteine weicht im Laufe des 18. Jahrhunderts allmählich vom geltenden Schuh oder Fuß ab und ist merklich kürzer als die der mittelalterlichen Backsteine (Tab. 2.3). Außerdem wird bei neuzeitlichen Backsteinen eine Tendenz zur Maßvereinheitlichung gleichsam hin zu einem Normmaß sichtbar, die sich nur durch die „Peuplierungspolitik“ der Fürsten nach dem 30-jährigen

Abb. 2.41 Nürnberg, Mauthalle. Backstein- und Dachziegelformate des Mittelalters eingemeißelt in die Sandsteinwand



Krieg erklären lässt. Beispielsweise holte der Markgraf von Ansbach zum Wiederaufbau insbesondere Maurer aus Österreich in sein ausgeblutetes Land (Maier 1987).

Angeregt durch das große Vorbild Versailles begannen die vielen kleinen Territorialfürsten außerdem mit ungeheuer großen Schloss- und Städtebaumaßnahmen. Zu diesen zog es die Maurergesellen aus ganz Europa. Auf diese Weise wurden handliche Backsteinmaße herausgebildet und bis in die fernsten Winkel des Kontinents verbreitet. Die lokalen Ziegeleien haben diese aufgegriffen oder sich ihnen im Format angenähert. Die Breite der Backsteine resultierte wieder ungefähr aus der Hälfte der Länge; ihre Dicke schwankt zwischen einem Viertel und einem Fünftel der Länge. Sie sind also deutlich dünner als ihre mittelalterlichen Vorfahren. Dies hängt ganz entscheidend von der fortgeschrittenen Entwicklung der Brennöfen und der Verbesserung der verwendeten Lehme ab.

Die jeweils in einem Herrschaftsgebiet vorgeschriebenen Backsteinmaße stateten die Regionen Deutschlands mit unterschiedlichen Backsteinformaten aus. Da die vielen kleinen deutschen Fürstentümer wie auch die Reichsstädte zumeist keine „*terrae clausae*“, d. h. geschlossene Territorien, gewesen sind und im Laufe der Geschichte ihre Grenzen durch Erbfall, Kauf oder Friedensschlüsse ständig verändert haben, finden sich heute gleiche Backsteinformate schier zusammenhanglos in ganz Deutschland verstreut.

Gleichwohl können Backsteinformate für den Bauhistoriker ein wichtiges Hilfsmittel zur Datierung der Entstehungszeit eines Mauerwerks darstellen.

2.2.5 Dekor an Backsteinwänden

Mit der Baukunst der Renaissance setzte sich bereits vor dem 30-jährigen Krieg in Anlehnung an antike, römische Wände wieder das Bauen mit Backsteinen und zugehauenen Natursteinen in ein und derselben Außenwand durch. Die Backsteinmauer bildete den sich unterordnenden Wandfond, während Natursteinteile dekorativ als Wandsockel, Gesimse, Fenstergewände oder Portalverdachungen eingepasst wurden. Die Baumeister der Renaissance und besonders des Barocks legten größeren Wert auf die gleichmäßige Färbung der Flächen; erst gegen 1800 trat,

Abb. 2.42 Burg auf Fehmarn, Pfeiler in der Pfarrkirche. Selbst die Backsteinwände wurden mit Quadermalerei überfasst



wenn auch sehr vereinzelt, an der Küste, vielleicht unter englischem Einfluss, eine Freude an möglichst bunter Mischung verschiedener Farbtöne auf. Zumeist wurde die Backsteinwand jedoch nicht sichtbar gelassen, sondern verputzt. Der Verputz setzte den Baumeister in die Lage, auch auf dem Wandfond kostbare Steinmetzarbeit durch Imitations- bzw. Quadermalerei vorzutäuschen (Abb. 2.42).

Mit Hilfe von oftmals aufwendig geschmiedeten Mauerankern wurde überall in Deutschland zum einen die Tragfähigkeit der Mauern verbessert, zum anderen der statische Verbund zwischen gegenüberliegenden Wänden und insbesondere zwischen Mauern und Holzbalkendecken sichergestellt sowie schließlich die Wandfläche dekoriert. In Lübeck hat man solche zu Zieraten geschmiedete Eisenbänder ausführlich dokumentiert (Finke et al. 1989, Abb. 2.43).

Eine weitere Möglichkeit der Dekoration war die Verwendung von glasierten Ziegeln wie etwa am, von 1466–1478 vom Ratsbaumeister Heinrich Helmstede erbaute Holstentor in Lübeck (Abb. 2.44).

Im 19. Jahrhundert lässt sich folgende Verwendung des nunmehr mehr oder minder industriell hergestellten Mauerziegels beobachten, die zunächst von Norddeutschland aus auf das gesamte deutsche Reichsgebiet ausstrahlt: (Ziegelindustrie)

In Preußen erhob Karl Friedrich Schinkel (1781–1841) den Mauerziegel wieder zu einem Architektur bestimmenden Element. 1832–1836 wurde der Neubau auf

Abb. 2.43 Lübeck, Marienkirche. Starke eiserne Maueranker im Backsteinmauerwerk der Kirchtürme



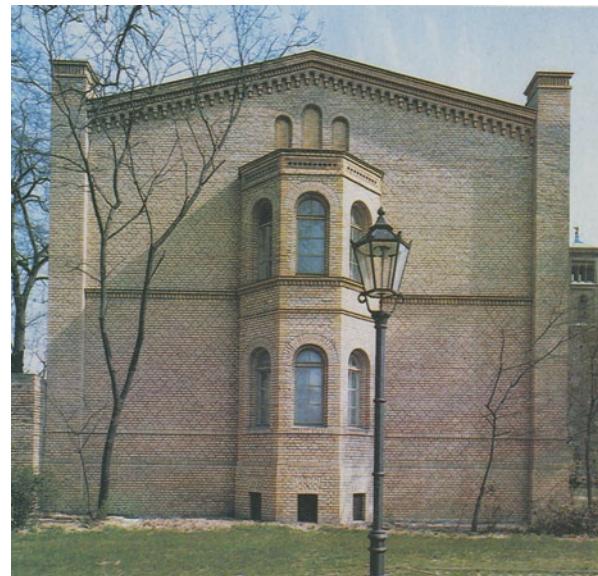
Abb. 2.44 Lübeck, Burgtor. Glasierte und Formbacksteine schmücken die Mauer



dem alten Packhof in Berlin zwischen Kupfergraben und Friedrichwerderscher Kirche nach seinem Entwurf realisiert. Das konstruktive Stützenraster mit 8 Achsen in jeder Richtung lag bei 5,55 m. Die Vormauerung aus roten, unverputzten Backsteinen bestand teilweise auch aus Terrakotta-Schmuckfeldern. Dem Berliner Vorbild folgend haben die alsbald einem eklektischen Historismus verpflichteten Architekten überall in Deutschland vor allem historisierende Zierverbände entworfen und zur Ornamentierung ihrer Gebäudefronten eingesetzt.

Die in der Nachfolge Schinkels beliebt gewordenen Ziegelbauwerke im zweiten Drittel des 19. Jahrhunderts besitzen einfache, fast karge geometrische Baukörper mit zurückhaltend plastisch gegliederten Oberflächen. Die Bautechnik der Wände bestimmt die Oberflächenstruktur. Es handelt sich nämlich um Mauerwerk im Binder- bzw. Kreuzverband als Tragkonstruktion für die Außenwand meist in einer Dicke von 49 cm, die sowohl statische als auch klimatische Anforderungen dieser Zeit berücksichtigt. Der Kreuzverband mit seiner diagonalen Wirkung der Fugen arbeitet dabei den horizontal gelagerten Steinschichten optisch entgegen. Dies kann man am 1845 von Ludwig Persius entworfenen, ehemaligen Diakonissenkrankenhaus Bethanien in Berlin-Kreuzberg beeindruckend erfahren (Abb. 2.45).

Abb. 2.45 Berlin, Diakonissenkrankenhaus Bethanien. Diagonalfugen im Kreuzverband



Gestalterische Mittel der Fassade sind Öffnungen für Fenster und Türen mit tief abgestuften Leibungen, mit senkrechte Pfeiler andeutenden Mauervorlagen bzw. Lisenen, mit kreis- oder segmentförmigen Bögen überbrückt. Deswegen spricht man bei diesen Gebäuden auch vom „*Rundbogenstil*“. Desweiteren werden folgende Gestaltungselemente eingesetzt: bandförmige rote Steinschichten in der gelben Wandfläche, betontes Sockel-, Gurt- und Hauptgesims als schmückendes wie gliederndes Band. In Fällen reicherer, ornamentierender Gestaltung setzen geometrische oder vegetabil-plastische Formelemente aus Terrakotta wie Kapitelle, Akrotere, Archivolten oder figürliche Darstellungen Akzente. Gerne werden auch Eingangsarkaden auf Säulen mit glatten oder gemauerten Schäften gebaut wie z. B. an der von Friedrich August Stüler als Weiterentwicklung der Schinkelschen Vorstadtkirchen entworfenen und von Gustav Möller 1859–1861 gebauten St. Lukas-Kirche in Berlin-Kreuzberg.

Nach der Gründung des Deutschen Reiches kam es zwischen 1870 und 1890 zu Ausweitung der Farbpalette der Mauerziegel. Ein Gebäude oder eine Fassade wurde jetzt allein mit Mauerziegeln gebaut. Meistens wählte man dafür rotfarbene, sehr gerne auch gelbe Steine. Neben dem Grundformat gab es die daraus entwickelten Formsteine. Sie besaßen manchmal auch eine farbige, bevorzugt grüne Glasur. Architekten setzten derartig gefärbte Mauerziegel für ihre Gebäude ein. Zumeist bleiben Ornamente dabei im Wandfond, können aber auch, allerdings nur geringfügig, plastisch hervortreten. Dann zeigt sich die intensive Wirkung der Schattenbildung auf der Fassade. Beispielhaft findet man diese Art der Gestaltung an den Arbeiterwohnhäusern in Berlin-Spandau.

Der Wandfond des Gebäudes kann aber auch mit einer hellen Putzoberfläche ausgestattet sein. Architekturelemente wie Risalite, Lisenen, Fenster- und Türeinfassungen, Gesimse, Bögen, Pfeiler und bildnerische Schmuckelemente bestehen

Abb. 2.46 Berlin, St.Afra-Kirche. Weiße Putzflächen kontrastieren mit roten Backsteinen



Abb. 2.47 Berlin, Kunstmuseum. Das rote Backsteinmauerwerk wurde mit reichem Dekor geschmückt, u. a. mit Terrakottaplatten und Mosaiken



dann im Gegensatz dazu zumeist aus roten Ziegeln, so an der 1898 gebauten St. Afra-Kirche in Berlin-Wedding. Die weiße Putzfläche kontrastiert prächtig mit dem roten Blendmauerwerk. Diese Art der Fassadengestaltung wurde in ganz Deutschland äußerst beliebt (Abb. 2.46).

Der rot gebrannte Ziegel gibt den farblichen Grundton der Fassade, der als farbliche Abweichung zu anderen Baustoffen gerne eingesetzt wird. Signifikante Fassadenelemente wie Fenster- oder Türgewände oder Blendarchitekturen werden aus Natursteinen oder Stuck und Putz hergestellt. Selbst farbige Mosaiken, sandsteinerne Reliefplatten und sogar Terrakottaplatten geben der Fassade ein farbenreiches, buntes Aussehen, wie es besonders qualitätvoll am 1876–1881 von M. Gropius und H. Schmieden erbaute Kunstmuseum in Berlin größtenteils erhalten blieb (Abb. 2.47).

In die Ziegelwände konnten außerdem besondere, gliedernde und ornamentierende Elemente aus bildnerisch geformten Natursteinen, aus Putz oder aus Stuck eingefügt werden. Diese Elemente sind in der Regel besonders üppig reliefiert, so etwa am 1903–1904 erbauten Postamt in Berlin-Tiergarten.

2.2.6 Industriell gefertigte Mauerziegel

Mit der Industrialisierung wurde auch bald die Herstellung der Mauerziegel mechanisiert. Zunächst gab es Maschinen, die das Abstreichen und Formen übernahmen. Erst dann setzte sich ein Verfahren durch, bei dem die Ziegel ihre Form durch Strangpressen erhalten haben und geschnitten wurden. Stranggepresste Ziegel haben eine sehr glatte Oberfläche. Im Strangpressverfahren lassen sich auch Sonderformen wie Lochziegel fertigen. Andere Fortschritte gab es beim Brennen. Zunächst wurde durch die so genannte überschlagende Flamme die Temperatur im Meiler gleichmäßiger und damit der Ausschuss oder der Anteil minderer Qualität verringert. Infolge der hohen Brenntemperaturen verlor allerdings das Ziegelmehl seine frühere hydraulische Wirkung (Scholz 1999).

Als Friedrich Hoffmann 1859 seinen ersten Ringofen baute und damit die Willkür des auf Geschick und persönlicher Erfahrung beruhenden, bisherigen Brandprozesses zu einer systematischen, mit wissenschaftlicher Sicherheit behandelbaren Technik machte, setzte er die oben geschilderte Neubelebung des Backsteinbaues in Gang. Das Aufkommen der industriellen Ziegelfertigung ermöglichte die massenhafte Herstellung und erwirkte eine Verbilligung des zugleich maßhaltigen Mauerziegels, der bei deutlich höheren Temperaturen wie früher gefertigt wurde. Klinker, d. h. Vormauerziegel, die bis zur Sinterung gebrannt wurden, eigneten sich vor allem für große Klinkerfassaden, insbesondere von Kirchen und im Industriebau.

Der industriell gefertigte Mauerziegel wurde in der Folgezeit stetig verbessert und wird heute vollautomatisch hergestellt. Darüber hinaus haben sich im späten 19. und im frühen 20. Jahrhundert doppelschalige Mauerwerke ohne mittlere Füllschicht, also nur mit einer Luftsicht dazwischen, und Mauern aus verschiedenen harten Mauerziegeln z. B. aus frostbeständigen Vormauerziegeln und weicheren Hintermauersteinen entwickelt. Fritz Schuhmacher hat als Oberbaudirektor 1909–1933 mit der Wiederbelebung des werkgerechten Backsteinbaues der Stadt Hamburg ein nordisch herbes Lokalkolorit geben können. Er griff insbesondere mittelalterliche Verbände auf.

Die Modernität dieser Mauern verrät jedoch der Dreiviertelstein in der Läufer schicht jeweils am Maueranfang und vor allem das nun verwendete, neue Backsteinformat, das Reichsformat (s. Tab. 2.3).

Die 1919/1920 erbaute Großstation Nauen für drahtlose Telegraphie von Hermann Muthesius zeigt Fassaden ausschließlich mit im Reichsformat gemauerten Klinkern. Die architektonische Ausschmückung ist sehr zurückhaltend. Das Gebäude passt sich gut in die ebene Landschaft des Havellandes ein. Die dunklen Klinker unterstreichen die Schlichtheit und imposante Größe. Mit Verzierungen wurde recht sparsam umgegangen. Was hier wirkt, sind Form und Ausmaß. Dabei wurde

die Klinkerschale als Verblendwerk vor eine Stahl- oder Eisenbetonkonstruktion gesetzt, wie etwa auch bei der 1918–1926 von Fritz Schuhmacher gebauten Finanzbehörde am Gänsemarkt in Hamburg (Benevolo 1988).

2.2.7 Moderne Mauerverbände und -formate

Mit der Reichsgründung 1871 wurde das Format der Mauerziegel im gesamten Deutschen Reich einheitlich normiert; das damals festgelegte Reichsformat wies ein Steinmaß von $25\text{ cm} \times 12\text{ cm} \times 6,5\text{ cm}$ auf (s. Tab. 2.3). Damit war der Mauerziegel erstmals Bestandteil des metrischen Systems. Die Lagerfuge, im Mittelalter noch bis zu 4 cm stark, schrumpfte jetzt auf exakt 1,2 cm, weil 13 Backsteinschichten aufeinander gemauert zusammen mit ihren Mörtelfugen genau einen Meter Mauerwerkshöhe ergeben sollten (Opderbecke 1910).

Im März 1957 wurde das Reichsformat einheitlich im geteilten Deutschland durch das in der neuen DIN 105 festgelegte Normalformat ersetzt. Dieses beträgt seither genau $24\text{ cm} \times 11,5\text{ cm} \times 7,1\text{ cm}$. Mit den Mörtelfugen ergeben jetzt zwölf aufeinander gesetzte Schichten einen Meter Mauerwerkshöhe und vier hintereinander vermauerte Läufer mit je einer Stoßfuge von 1,0 cm Dicke einen Meter Mauerlänge. Ergänzend dazu wurden verschiedene Formate festgesetzt: Neben dem Normalformat NF gibt es das Dünnformat DF mit nur 5,2 cm Steinhöhe und zudem Großformate, die alle aber ein gemeinsames Vielfaches des DF oder NF aufweisen (Scholz 1999, Abb. 2.48).

Im Zuge der zwingend zu verbessernden Wärmedämmung von Außenwänden füllte man in die Luftsicht des zweischaligen Mauerwerks wärmedämmendes Material. Dies kam vor allem in den sog. Fertighäusern zur Anwendung. Da solches Mauerwerk überall in Deutschland einheitlich zur Verwendung empfohlen wurde, gab man bewusst das norddeutsche Lokalkolorit auf.

Ebenfalls aus Gründen der Verbesserung der Wärmedämmung entwickelte die Ziegelindustrie um 1970 den porosierte Mauerziegel, der aufgrund seines geringen Gewichts zumeist in großformatigen Blöcken hergestellt und verwendet wurde. Die Steine werden mit Dämmmörtel vermauert, wobei die Stoßfuge ohne Mörtel auskommt, weil die Steinstöße aus ineinander greifenden Zähnen bestehen. Damit wurde eine weitgehend homogene, vermauerte Wand möglich. Die Hersteller füllten die Kammern der porosierte Steine schließlich mit Blähton, Perlite oder Styroporkügelchen, um die Wärmedämmmeigenschaften des Steins noch einmal zu steigern. Diese Steine mit ihren porosierte dünnen Ziegelstegen konnten nun nicht mehr in traditioneller Weise mit dem Maurerhammer zugeschlagen, sondern mussten mit Steinsägen sorgfältig geschnitten werden. Außerdem mussten die Maurer darauf achten, dass dieses empfindliche Steinmaterial nicht durch unsachgemäßen Transport, Lagerung und Verarbeitung mechanisch bestoßen oder zerbrochen wurde. Die früher oft so grobschlächtige Tätigkeit des Maurers entwickelte sich zu einer filigranen Handwerksarbeit, zu der die häufig nur notdürftig angelernten Bauarbeiter auf den heutigen Baustellen freilich kaum mehr in der Lage sind (Abb. 2.49).

Abb. 2.48 Pegau, Alte Polizei. Durch Ausbesserungen im Mauerwerk, die zu verschiedenen Zeiten notwendig geworden waren, kommen hier beinahe alle Backsteinformate vor

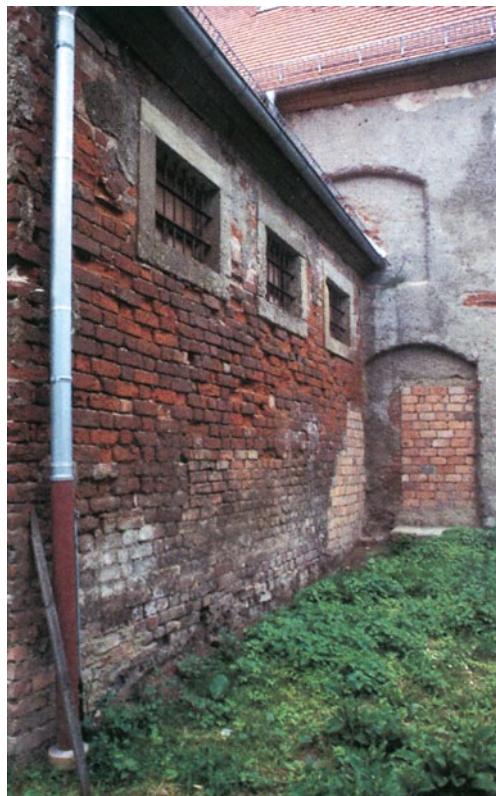


Abb. 2.49 Mauerwerk aus porosierte Mauersteinen



Abb. 2.50 Schottersmühle/
Oberfranken. Kellermauer-
werk mit Lehm Mörtel



2.3 Historischer Feuchteschutz

Eine Mauer vor Feuchte und den mit ihr verbundenen schädlichen Mechanismen zu schützen, war zu allen Zeiten ein wichtiges Anliegen der Baumeister. Deshalb errichteten sie zumeist die ersten Steinschichten eines Mauerwerks aus Natursteinen mit einem Lehm Mörtel, der als Lagerfuge vollflächig verhinderte, dass Feuchtigkeit aus dem Baugrund kapillar in die Mauer aufsteigen konnte. Kellerwände wurden häufig in ganzer Höhe mit Lehm Mörtel gemauert. Insbesondere Werksteinsockel von Fachwerkgebäuden besitzen zumeist Lehm Mörtelfugen. Der dafür verwendete Lehm Mörtel bestand aus geeignetem Lehm und Wasser. Er erhärtete durch das Verdunsten des Wassers. Die Zumischung von Kälberhaaren, Schweineborsten, Stroh, Heu und Kuhmist minderte die Schwindrissgefahr (Schmitt und Heene 1993, Abb. 2.50).

Eine weitere Möglichkeit, die Wand vor aufsteigender Feuchte zu schützen, war die Herstellung von Lager- oder Stoßfugen aus Teerpech und im 19. Jahrhundert aus Asphalt. Das erhitze Pech wurde in die Fugen gegossen und bildete nach dem Erkalten eine dauerhafte schwarze Vergussmasse. In der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts entwickelte die Bauindustrie wirksame Mauersperrpappen (Scholz 1999) aus mit Teer getränkten Rohpappen oder Wollfilzpappen, die in der Hauptsache aus Lumpen bestanden. Die Fa. A. W. Andernach in Beuel a. Rhein erwarb in den Jahren nach der Reichsgründung mehrere Reichs-Patente zur Herstellung „besonders wetterfester, wasserdichter, feuersicherer Asphalt-Dachpappen“ und als Spezialität „Asphalt-Steinpappen“, dazu das Patent auf „Siebels Bleisolierplatten aus Gußasphalt“ (Abb. 2.51).

Die Pappen legte man zumeist in die Fuge der ersten Steinschicht oberhalb der Geländeoberkante oder unmittelbar unterhalb der Kellerdecke ein. Beim Kellerinnenmauerwerk wurden solche Pappen auf die erste Schicht über dem Fußboden aufgebracht. Erst als anfangs des 20. Jahrhunderts dauerhafte Bitumenemulsionen als Beschichtung für Kelleraußenwände eingesetzt wurden, konnte die inzwischen entwickelte Bitumenpappe auch im Kelleraußenmauerwerk knapp über dem Fußboden verlegt werden. Damit war die dauerhafte Lösung, wie sie heute die DIN 18195 auch in ihrer neuesten Fassung für den Neubau vorschreibt, geboren (Weber 2000).

Auch Mauerwerk mit ganz exakt ausgebildeten, passgenauen Werksteinfugen leistet dauerhaft Widerstand gegen eindringendes Wasser (s. Abb. 1.21). Der Maurer in

Abb. 2.51 Briefpapier der Firma Andernach mit Angabe ihrer Produkte gegen Baufeuchtigkeit



vergangener Zeit wusste, welche Natursteine mit einem besonders geringen Wasseraufnahmevermögen für Kellermauern eingesetzt kaum Feuchtigkeit aufsaugen und an den Innenraum abgeben konnten. Es handelte sich in der Hauptsache um Mauersteine aus besonders dichtem Sandstein oder Ergussgesteinen wie Granit, Syenit, Basalt und Diabas, also um Steine mit einer Rohdichte $\rho=2.800\text{--}3.000\text{ kg/m}^3$. Der letztgenannte dunkelgrüne Stein zeichnet sich durch eine Wasseraufnahmekapazität von $<1,0$ Volumenprozent aus. Wohnhäuser wurden bis ins 19. Jahrhundert hinein mit Kellermauern aus Granit, Basalt oder Diabas vor Feuchtigkeit geschützt. Oft wurde

Abb. 2.52 Leipzig, Harnackstr.3. Links sind die dunklen Diabassteine als Schutz gegen aufsteigende Feuchte vermauert. Darüber wurde mit Mauerziegeln die Kellerwand vollendet



Tab. 2.4 Porosität, Dichte und Wasseraufnahme einiger für Mauerwerk verwendeter Natursteine. (Die Kenndaten stammen aus: Knöfel, Lucas, Weber)

Gesteinsart	Porosität Volumen (%)	Dichte ($\rho 10^3$ kg/m 3)	Wasseraufnahme DIN 52103 Volumen (%)
Hellgrauer dichter Felsengips aus der Windsheimer Bucht	2	2,28–3,1	0,8
Roter fester Schilfsandstein	18,3	2,11	17,0
Köln, Schlaitdorfer Sandstein	12–17	2,15	8–12
Abbacher Grünsandstein	17–23	2,13	12–17
Quarzsandstein	0,5–25	2,64–2,72	0,5–24
Tuffstein	20–30	2,62–2,75	12–30
Granit	0,4–1,5	2,62–2,85	0,4–1,4
Basalt	0,2–0,9	3,00–3,15	0,2–0,8
Diabas	0,3–1,1	2,85–2,95	0,3–1,0
Quarzit	0,4–2,0	2,64–2,68	0,4–1,3
Travertin	5,0–12	2,69–2,72	4,0–10

das Kellermauerwerk nur bis in Höhe des Grundwasserstandes aus solchen sehr dichten Natursteinen errichtet, oberhalb mauerte man mit Backsteinen weiter (Abb. 2.52).

Eine ähnlich geringe Saugfähigkeit besitzen auch Gipssteine aus der Windsheimer Bucht und Quarzsandsteine. Wie die Tab. 2.4 zeigt, können dagegen die meisten Sand- und Tuffsteine viel bis sehr viel Wasser aufsaugen und sind relativ rasch durchfeuchtet. Ihre große Wasseraufnahmefähigkeit korreliert mit ihrer Porosität, deshalb ist der Tuffstein der saugfähigste aller genannten Steine.

Um Mauerwerk trocken zu halten, wurden im 19. Jahrhundert Luft- oder Isolierschichten in ihm empfohlen. (Opderbecke 1910), weil die in diesen eingeschlossene Luft als ruhende Schicht und daher als schlechter Wärmeleiter angesehen wurde. Die Luftsicht sollte darüber hinaus stets trockene Außenmauern garantieren. Es stellte sich jedoch schnell heraus, dass die Luft in den Hohlräumen im Mauerwerk keine ruhende sein konnte, denn es konnte immer feuchtwarme Luft von Außen oder von Innen in die Luftsicht diffundieren. Mineralische Baustoffe sind wasserdampfdurchlässig, lassen also Wasserdampfdiffusion zu. Das Temperaturgefälle

Abb. 2.53 Belüftungsröhrchen nach Knapen, sog. Mauerlunge



zwischen Außenluft und Innenraum führt dazu, dass die Luftsicht zwei unterschiedlich warme Mauerwerksteile trennt. Es entstand also immer Tauwasser am jeweilig wesentlich kälteren Mauerwerksteil. Dieses Problem konnte auch mit Umlaufluft in den Luftsichten nicht gelöst werden.

Dieselbe Unwirksamkeit stellte man schnell bei den Patent-Falztafeln „*Kosmos*“ fest. Dabei sollten wasserdichte Falztafeln auf die feuchte Mauer genagelt und anschließend verputzt werden. In ihren Fälzen sollte sich trockene Luft halten, in die dann die Feuchte aus dem Mauerwerk hineinwandern sollte. Die Falztafeln versagten jedoch sehr schnell. Sie kaschierten in der Tat nur die wahre Feuchtigkeit des Mauerwerks. Da sie selbst wasserdicht waren, konnte das Wasser in der Wand nicht verdunsten. Es stieg infolgedessen im Mauerwerk immer höher, bis es einen Verdunstungshorizont erreichte (Frössel 2009).

Im 20. Jahrhundert kamen die Belüftungstonröhren nach Knapen oder die Kunststoffröhren als Mauerlunge auf. Sie sollten vor allem Haussockel entfeuchten. Auch diese stellten sich schnell als unwirksam heraus, denn in den Röhren entstand ein Kleinklima, das zum Tauwasserausfall im Röhren führte (Abb. 2.53).

Eine nachhaltige Entfeuchtung von Mauerwerk bot dagegen der Isoliergraben. Solche Gräben wurden vor der Kellermauer angelegt, um ihre Erdberührung zu verhindern. Außerdem konnte man jetzt auch Kellerfenster anordnen. Die Gräben mussten wenigstens 70 cm breit sein, um eine allfällige Reinigung bzw. ein Begehen zu ermöglichen. Die Isoliergräben blieben entweder oben offen oder wurden mit Steinplatten oder mit Gewölben überdeckt. Dem Erdschub widerstehende Stützmauern trennten die Gräben vom benachbarten Erdreich. Diese wiederum konnte man mit Hilfe von Mauerbögen mit dem Kellermauerwerk verspannen.

Die Baumeister des 19. Jahrhunderts versuchten das Durchfeuchtungsproblem auch mit Isoliermauern aus hartgebrannten Klinkern in Zementmörtel zu lösen. Diese wurden in einem Abstand von wenigstens 7 cm vor dem eigentlichen Kellermauerwerk auf einer Verbreiterung des Kellerfundaments gegründet. Der Hohlraum zwischen Isoliermauer und Kellermauer musste selbstverständlich entwässert und gelüftet werden (Opderbecke 1910).

Die Kellermauern hat man oft auch mit innen angebrachten, lotrechten Isolierschichten trocken gehalten. Sie sind damals schon nach dem Prinzip der „*innenliegenden Wanne*“ konstruiert worden. Dazu wurden Asphaltestrich, Asphaltplatten oder „*Siebels-Blei-Isolierplatten*“ eingesetzt. Die Asphalt- oder Isolierplatten wurden an die Kellerwand geklebt und durch eine Vormauerung geschützt.

Weitere historische Abdichtungsmaterialien seien hier kurz aufgezählt (s. auch Balak und Pech 2008):

Glas wurde als kapillarbrechende Schicht im Mauerwerk entweder als grüne, 3,5 mm dicke, unten gerillte Tafelglasplatten im Sandbett oder als 3–5 mm dicke Rohglastafeln im Zementmörtel verlegt. Die Fugen wurden verkittet.

Blei-Isolierplatten, im Handel als „*Siebels Blei-Isolierplatten aus Gussasphalt*“, bestanden aus 0,5 mm starkem Walzblei, das in mit Teer getränkter Pappe eingelegt wurde. Diese Platten verhinderten im Mauerwerk aufsteigende Feuchtigkeit.

Asphalt ist ein seit Urzeiten verwendetes Abdichtungsmittel. Sein Name ist griechischen Ursprungs, die Römer nannten es „*Bitumen*“. Zum Abdichten gegen aufsteigende Feuchte legte man eine Schicht aus reinem Asphalt oder Teer in einer Dicke von 2,5 cm auf eine Mauerwerksschicht auf. Manchmal verwendete man auch Teerpapier, ein in Steinkohlenteer getauchtes Papier, das man außerdem mit Sand bestreute.

Weiteres Abdichtungsmaterial war damals das Asphaltmastix, eine bitumenreiche Mischung aus Erdölbitumen, Sand und Gesteinsmehl, die Asphaltfilzplatten aus in heißen Asphalt getauchten und anschließend mit Sand bestreuten Filzplatten, der Gussasphalt, eine Mischung aus Asphaltmastix, Pech oder Teer und scharfkantigem Kies und schließlich das „*Goudron*“, dem Sammelbegriff für alle heißflüssigen Abdichtungsmassen. Des weiteren benutzte man zur Abdichtung feuchten Mauerwerks Mastixzement, Teerzement, Steinkohlenteer, Holzteer, Kolophonium und schließlich den sehr dichten, aber spröden Portlandzement.

Eine uraltes Verfahren, Backsteinmauerwerk gegen aufsteigende Feuchte abzudichten, war die Imprägnierung der Steine mit Seife und Alaun. Diese Methode war schon im alten Ägypten bekannt. Die Mauerziegel wurden zunächst mit flüssiger Seife und anschließend mit im Wasser gelöstem Alaun bestrichen.

2.4 Lehmmauerwerk

2.4.1 Lehmpisémauerwerk

Häufig errichtete man Mauern aus Lehm als Lehmstampfwand, die im Mittelalter als sog. „*Pisé*“-Bauweise von römisch-karthagischen Vorbildern übernommen wurden ist. Zunächst wurde eine Schalung aus Holzbrettern hergestellt, die mit Hilfe einzelner Holzbalken gegen seitliches Ausweichen gesichert wurde. Die gut durchgemischte, nasse Masse stampfte man in Schichten von 10–30 cm Höhe in diese Schalung ein. Dafür konnte jede fette Erdart, in der Hauptsache jedoch Lehm mit Strohhäcksel, Kälberhaaren oder Schweineborsten vermischt, verwendet werden. Nicht geeignet erschienen magerer Sand, fetter Ton, Dünger- und Humusboden.

Abb. 2.54 Lehmputz auf der Wand unter Kalkfarben



Nach dem Austrocknen und damit verbundenem Erhärten der Masse konnten Schalung und Querhölzer leicht beseitigt werden. Manchmal wurden diese durch die Mauer hindurch gehenden Holzbalken auch an Ort und Stelle belassen, weil sie wie beim Backsteinmauerwerk die Standsicherheit der Lehmmauer verbessern konnten. Solche Wände musste man wegen der schlechten Putzhaftung oberflächig kräftig aufkratzen, um sie anschließend mit einem Lehmverputz versehen zu können. In neuerer Zeit verwendet der Maurer auch einen Kalklehmputz auf einem Putzträger wie Hasendraht, Rippenstreckmetall oder Rabitz (Volhard und Röhlen 1999).

Da die Lehmwände trotzdem vor allem durch Nässe leicht beschädigt werden können, mussten sie zusätzlich durch baukonstruktive Maßnahmen geschützt werden: Weit übergreifende Dächer und vorzügliche Isolierung von unten – früher unten in die Mauer eingestampfte Tonschichten, seit Ende des 19. Jahrhunderts eingelegte Dachpappen – halfen, Schäden infolge von Witterungseinflüssen und aufsteigender Erdfeuchte weitgehend zu vermeiden. Das Lehmpisémauerwerk kommt heute nicht mehr sehr häufig, allenfalls als Kellermauerwerk oder in der Landwirtschaft, vor.

2.4.2 Lehmwände

Reine Lehmwände wurden seit dem 9. Jahrhundert auf niedrigen Steinfundamenten „*mit der Forke aus feuchten Lehmpatzen geschichtet und nach dem Trocknen mit dem Beil oder Spaten geglättet*“ (Mislin 1988). Mit Hilfe dieser sehr einfachen Technik entstand die Lehmpatzenwand. Sie wurden aus Wellerlehm oder Strohlehm, einem halbsteif aufbereitetem Gemisch aus Stroh und Lehm, hergestellt. Die schweren Mischungen bzw. Patzen aus Stroh und Lehm hat der Maurer ohne Schalung aufgebaut. Dabei wurden die Wände freihändig mit der Gabel bis zu 80 cm Höhe aufgesetzt und nach wenigen Tagen fluchtgerecht mit Spaten und Beil abgearbeitet. Wellerwände besaßen wie alle Lehmwände ein hohes Schwindmaß, deshalb musste man sie mehrere Monate lang austrocknen lassen, bevor man sie mit Lehmputz überziehen konnte (Abb. 2.54).

Abb. 2.55 Erlangen-Bruck.
Mit Lehm ausgemauerte
Fachwerkinnenwand



Lehmwände hat man andererseits auch aus in Formen gepressten und aus Strohlehm hergestellten Lehmsteinen oder Lehmformlingen aufgemauert. Der Strohlehm erhielt Beimengungen aus feinen Pflanzenfasern wie Spreu, Häcksel, Grannen als Bewehrung zur Verbesserung der Wärmedämmung der Lehmwand. Im Handstrichverfahren wurden weiche Lehmpatzen in rechteckige Formenrahmen geschlagen und mit einem Holzscheit abgestrichen. Im Strangpressverfahren wurden seit dem ausgehenden 19. Jahrhundert sog. „*Grünlinge*“ hergestellt, d. h. der zum Ziegelbrennen bestimmte Lehmabstoff wird erdfeucht in Formen gepresst und ungebrannt, also „*grün*“, vermauert.

Heute werden die Steine von einem durch ein Mundstück gepressten Strang abgeschnitten. Sie werden zumeist mit Lehmmörtel oder trocken ohne Mörtel vermauert. Die Wände werden anschließend kräftig aufgekratzt oder mit einem Putzträger überspannt, damit ein Kalkputz haftet. Sie können als Wandaufschüttungen, Deckenauflagen, Vorsatzschalen, trockene Stapelwände und sogar als tragendes Mauerwerk eingesetzt werden (Volhard und Röhlen 1999).

2.4.3 Fachwerkwände

Die nachweislich seit 800 Jahren in Mitteleuropa gebauten und noch heute erhaltenen Fachwerkhäuser bestehen aus einem Tragskelett aus Holz und Ausfachungen zwischen den Balken der Wände aus verschiedenen Baustoffen, häufig aus Holzstakungen mit einem Bewurf aus Strohlehm, aus Lehmsteinen, aus zum Mauern verwendeten Lehmmörteln und sind meistens mit Lehm verputzt. Die Maurer verschlossen die Gefache auch mit lokal verfügbaren Baustoffen, z. B. mit Mauerwerk aus Natursteinbrocken, aus Backsteinen oder einfach mit in fetten Kalkmörtel gelegten Steinbrocken aller Art. Manchmal wurden die Gefache auch mit sauber verfügten Klinkern ausgemauert. Auch Holzbretter dienten als Gefachverschluss (Abb. 2.55).

Wegen der hohen Sorptionsfähigkeit des Baustoffs Lehm gegenüber Nässe wurden die Ausfachungen auf der Wetterseite des Gebäudes durch überstehende Dächer

Abb. 2.56 Herbrechtingen, Bauernhaus. Die mit Lehm ausgefachte Fachwerkinnenwand macht die Schiefstellung klaglos mit



und später auch durch Verkleidungen, z. B. aus Holzschindeln oder Schieferplatten, vor Regen geschützt. Sichtfachwerk wurde selbstverständlich nur innen verputzt. Bei Zweckbauten wie Scheunen, Remisen oder Ställen wurde auch in den Städten auf Verputz verzichtet.

Die Wanddicken des Fachwerks entsprachen der Stärke der Holzbalken, in der Regel 16 cm bis maximal 18 cm. Wegen dieser geringen Wandstärke konnten Ausfachungen mit Lehm auf Stakung nicht stärker als die Holzbalken und Lehmsteine nur im Läuferverband ausgeführt werden. Dabei bildete die Fuge zwischen Gefachverschluss und Fachwerk balken eine Problemzone: Da Holz und Lehm jeweils ein unterschiedliches Verformungsverhalten durch Schwinden und Quellen zeigen, bilden sich an allen Balken der Fachwerk wand entlang Risse, in die Feuchtigkeit eindringen und wieder verdunsten kann. Die Abdichtung dieser Risse am historischen Fachwerk gegen Feuchteintrag und Luftdurchströmung ist nicht möglich.

Mit Lehm ausgefachte Fachwerk wände machen die Schiefstellungen eines alten Gebäudes mit. Sie können durchaus in der Schiefstellung eine neue Haltbarkeit gewinnen (Abb. 2.56).

Lehm- bzw. Lehmsteinwände besitzen einen Wärmedurchgangskoeffizienten $U=2,315 \text{ W/m}^2\text{K}$. Sie haben deshalb kaum eine wärmedämmende Wirkung. Um historisches Fachwerk deswegen vor unförmigem Einpacken in Wärmedämmung zu retten, hat der Gesetzgeber in der Energieeinsparungsverordnung 2009 (EnEV 2009) es von den dort festgelegten Anforderungen befreit.

Abb. 2.57 Schiefer Turm von Pisa



2.5 Fundierungen

Während die Römer große Sorgfalt auf eine solide Fundamentierung ihrer Bauwerke legten und bereits das frosttief „betonierte“ Streifenfundament kannten, waren die mittelalterlichen Bauten zumeist unzureichend gegründet, wie es besonders spektakulär der freistehende Campanile des Doms zu Pisa, der sog. „Schiefe Turm“ zeigt (Abb. 2.57).

Selbst bei Großbauten wie dem Mainzer Dom führten die mangelhaften Fundamente rasch zu schweren Schäden im aufgehenden Mauerwerk und mussten entsprechend repariert werden. Diese Neigung zu nicht ausreichenden Fundamenten zeigte sich auch an Wehrbauten. Die Fuldaer Stadtmauer (Abb. 1.17), die größtenteils aus dem 12.–15. Jahrhundert stammt, zeigt, wie durch Sondagen festgestellt werden konnte, kaum ein Fundament. Die ganze, immerhin über vier Meter hohe Mauer mit Wehrgang steht heute noch größtenteils direkt auf dem Humus der Fuldaue. Ihr Fundament besteht vor allem aus demselben in Kalkmörtel verlegtem Kalkbruchstein-Mauerverband wie das aufgehende Mauerwerk.

Am 24. Mai 1757 zeigte der östliche Teil des NO-Flügels des Marstalls am Residenzschloss in Ansbach innen starke Verformungen als Folge einer allmählichen

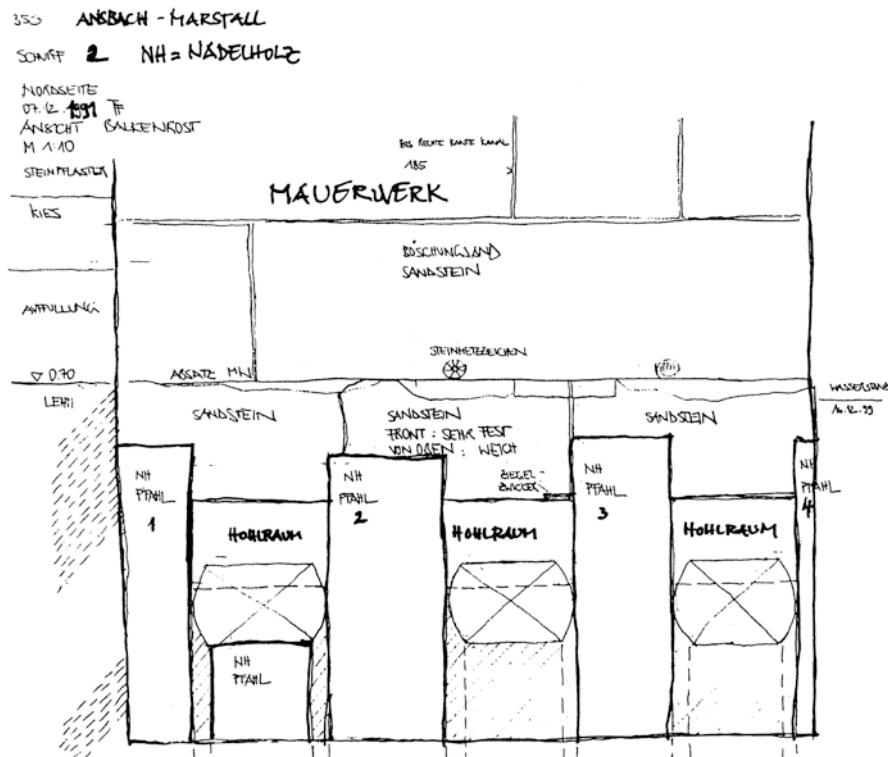


Abb. 2.58 Ansbach, Marstall. Holzpfähle als Fundament. (Zeichnung nach Ing.-Büro Dr. Bergmann, München)

Durchbiegung der Holzdecke. Der markgräfliche Bauinspektor Steingruber vermutete, dass der großzügige Zimmerausbau im 1. Obergeschoss die Fundamente der Deckenstützen überlastet hatte. Zwei Tage später hatte er dazu einen Detailplan gezeichnet, der die Situation darstellte. Dieser Plan und eine Variante dazu zeigen im Querschnitt durch den NO-Flügel im Erdgeschoß die 1729 noch von ihm selbst nach Plänen des Obristbaudirektors Zocha gebauten Holzbalkendecken und zwei sie stützende, tuskische oder „römische“ Pfeiler mit ihren Fundamenten und Holzpfählen darunter. Sie sollten die Unterzüge der Holzbalkendecke mit dem Fußboden des Obergeschosses abstützen. Diese Pfeiler hatten sich samt ihren Fundamenten gesetzt und mussten nun durch neue Gründungspfähle standsicher gemacht werden (Maier 2005b, Abb. 2.58).

Die Missachtung ausreichend standsicherer Fundamente lässt sich auch im Wohnhausbau beobachten. Dies führte gleichwohl recht selten zu Setzungsschäden an den Gebäuden, da die Baumeister dieser Zeit sich mit dem Baugrund intensiv beschäftigten. Stadtgrundrisse des Mittelalters zeigen in ihrer Topographie zugleich den Verlauf des tragfähigen Baugrundes.

Abb. 2.59 Wohnhaus-Fundament aus dem Jahre 1698. Es ist nur etwa 60 cm hoch und wesentlich breiter als die Wohnhauswand



Die Fundamente der Wohnhäuser bestanden damals oft nur aus Steinbrocken und Kalkmörtel, die in Fundamentgräben eingefüllt wurden. Haltbare Fundamente wurden aus unbehauenen Sandsteinen gemauert. Um die Fundamentoberfläche zu ebnen, wurde sehr häufig obenauf eine Schicht Backsteinmauerwerk aufgemauert (Abb. 2.59).

Die Keller waren in aller Regel wesentlich kleiner als der Wohnhausgrundriss. Daher standen die Umfassungswände eines mittelalterlichen Hauses nur zum geringen Teil auf Kellermauerwerk, sondern zumeist auf ihrem eigenen kleinen Fundamentsockel. Ebenso die tragenden Zwischenwände.

Dies änderte sich erst allmählich in der Neuzeit. Im Barock wandte sich der Architekt dem Problem „*Fundament*“ gründlicher zu. Andererseits wurden jetzt, bedingt durch das Wachstum der Städte über ihre Stadtmauern hinaus, auch die sumpfigen Talauen mit Häusern bebaut. So kamen nunmehr Gründungen auf Eichenholzrosten und -pfählen immer häufiger zum Einsatz. Solche Holzgründungen zumeist aus Eichenstämmen, aber auch aus Ulmen und Buchen, waren freilich schon vom mittelalterlichen Brückenbau her bekannt gewesen. Die Stämme wurden entweder liegend zu einem Rost zusammengebunden oder senkrecht in den Baugrund gerammt. Sehr häufig findet sich auch der schräg eingerammte Stamm, der sich mit seinem Gegenüber überkreuzt. Oben auf den Stammenden wurden nicht selten Bretter aufgelegt, auf denen eine Schicht aus fettem Lehm das Austrocknen der eingerammten Holzstämme verhinderte. Diese Lehmschicht ergab dann die Gründungsebene für die gemauerte Hauswand. Durch die große Mauerdicke und das daraus resultierende hohe Gewicht wurde die fehlende Frosttiefe kompensiert, d. h. Frost machte diesen Konstruktionen wenig aus. Anders bei den Fachwerkfundamenten: sie sind zumeist vom Frost weitgehend zermürbt, da sie in der Regel zu schwach dimensioniert wurden.

Aus archivalischen Nachrichten und durch Untersuchungen vor Ort wissen wir, dass im 17., 18. und 19. Jahrhundert sehr gerne zuerkauftes Abbruchmaterial in

Abb. 2.60 Die nicht gegen Schub abgesicherte Wand des Getreidespeichers stürzte infolge des Aushubs für neue Fundamente im Nachbargebäude ein



die Fundamente von Neubauten eingebracht worden ist. Dadurch gelangten Gipsprofile, Holzteile und ein Gemisch aus Back- und Natursteinen von verschiedenen Abbrüchen in ein und daselbe Fundament. Das derartig durchmischte Füllmaterial wurde nun zusammen mit Kalkmörtel in die Fundamentgräben eingebracht. Solche Fundamentkonstruktionen finden sich sogar bei höfischen Bauten z. B. bei der evangelischen Pfarrkirche in Weidenbach in Mittelfranken, einer vom Hofbaudirektor Leopoldo Retty für den Markgrafen von Brandenburg-Ansbach errichteten Kirche (Maier 1991a). Um wieviel häufiger dürfen wir mit diesem reichlich sorglosen Umgang mit Fundamenten an Wohnbauten rechnen.

Da die Unterkellerung eines Wohnhauses seit dem Barock zur Regel geworden ist, erreichten die Fundamente seit dem 18. Jahrhundert automatisch ausreichende Frosttiefe. Die Keller wurden überwölbt. Trotzdem saßen sie auf Fundamenten, die für sich allein ohne den seitlichen, außen anstehenden Erdwiderstand statisch keinesfalls zureichten, um den Gewölbeschub aufzufangen. Soll heute neben einem solchen Keller ein neuer errichtet werden, so muss die alte Kellerwand stets ausreichend abgestützt werden, damit beim Ausschachten des neuen Kellers der alte nicht einstürzt. Der Einsturz kündigt sich nämlich nicht allmählich durch Rissebildungen oder Ausbauchungen an, sondern geschieht urplötzlich (Abb. 2.60).

Erst mit der Entwicklung des mathematischen Standsicherheitsnachweises, wie ihn die Naturwissenschaft zuerst im Frankreich des 18. Jahrhunderts führen lernte, gelang es, ausreichende Dimensionen für Fundamente zu berechnen. Diese exakte Methode, Fundamente zu konstruieren, setzten die Baumeister in Deutschland allgemein im 19. Jahrhundert ein. Mit der Einführung des Baustoffes Beton am Ende des 19. Jahrhunderts verschwanden die Stein- und Holzgründungen aus dem Bauwesen fast völlig.

Historische Mauern können nur dann sinnvoll und richtig instandgesetzt werden, wenn der Schadensgutachter wie einst der königliche Civilbauinspektor Schulz ihre Bestandteile genau kennt. Daher ist es erforderlich, dass er sich mit den Baustoffen, aus denen die Mauern gebaut sind, und ihren wichtigsten Eigenschaften vertraut gemacht hat und infolgedessen über ein gutes Grundlagenwissen verfügt. Auf diese Weise ist es ihm möglich, später vor Ort schon durch bloßen Augenschein erste Erkenntnisse über die schadhafte Mauer zu gewinnen. Deshalb seien hier die wichtigsten Baustoffe für historisches Mauerwerk und ihre Merkmale kurz besprochen.

3.1 Natursteine

In Deutschland gibt es zahlreiche Natursteine, die sich auch in der Vergangenheit zur Herstellung von Mauern eigneten. In der Regel wurde immer der Stein verwendet, der in der Nähe des zu errichtenden Gebäudes zu finden und leicht abbaubar war. Viele der historischen Steinbrüche sind heute allerdings erschöpft und nicht mehr in Betrieb.

Natursteine sind Bestandteil der festen Erdkruste und zunächst aus durch Abkühlung des unter der äußersten Erdkruste anstehenden Magmas, also aus Gesteinen in geschmolzener Form entstanden. Danach hat sich das bloßliegende Gestein infolge Verwitterung oder Verschiebungen bzw. Verwerfungen verändert und neue Gesteinsarten gebildet (Scholz et al. 1999).

Natursteine bestehen hauptsächlich aus Mineralien. Es gibt ungefähr 2.000 Mineralien, etwa 200 davon zählen zu den gesteinsbildenden, von denen wiederum nur 40 häufig anzutreffen sind (Weber et al. 1985). Die wichtigsten gesteinsbildenden Mineralien sind: Feldspat, Hornblenden, Augit, Quarz, Glimmer, Olivin, Kalkspat, Aragonit, Dolomit, Gips, Anhydrit, Limonit, Glaukonit, Tonmineralien, Steinsalz, Kalisalz, Graphit, Granate, Chlorite, Serpentin und Talk. Daneben sind auch andere Mineralien, die keine Gesteine bilden, von erheblicher Bedeutung, z. B. Magnetit und Hämatit.

Zur Bestimmung und Einteilung der Mineralien dienen folgende Kennwerte: Härte, Kristallform, chemische Zusammensetzung, Farbe, Strich auf einer unglä-

Tab. 3.1 Härteskala nach Mohs mit Härtevergleichsangaben. (Entnommen: Scholz et al. 1999, Tafel 1.1)

Mohsche Ritzhärte	Mineral	Finger-nagel	Kupfer-münze	(Fenster) Glas	Messer (Stahl)	Vickers-Härte in N/mm ² (gerundet)	Relative* Schleif-härte nach Rosival
1	Talk	Ritzt	Ritzt	Ritzt	Ritzt	20	0,03
2	Gips				leicht	300	1
3	Kalkspat	Ritzt nicht				1.700	3,75
4	Flussspat	Ritzt nicht			Ritzt	2.430	4,17
5	Apatit				schwer	5.980	5,42
6	Feldspat	Ritzt nicht			Ritzt schwer	9.120	31
7	Quarz				Ritzt	10.980	100
8	Topas				nicht	12.260	146
9	Korund					20.590	833
10	Diamant					98.070	117.000

*auf Quarz=100 bezogen

sierten Porzellantafel, Glanz, Lichtbrechung, Dichte (Gefüge, Porenraum), Spaltbarkeit (Widerstandsfähigkeit gegen Schlag) und das Aussehen von Bruchflächen, die muschelig, körnig oder faserig sein können.

Auf die drei wichtigsten Kennwerte sei hier zunächst noch näher eingegangen:

Härte ist der Widerstand, den ein Stoff dem Eindringen eines anderen entgegenstellt. In der Mineralogie dient als Maßstab für die Härte die von dem Wiener Gelehrten Mohs (1773–1839) aufgestellte Härteskala. Die **Mohsche Härteskala** umfasst zehn Härtestufen. Außerdem gibt es noch andere Härteskalen wie die „*Vickers-Härte*“ oder die „*Relative Schleifhärte nach Rosival*“ (s. Tab. 3.1).

Bei der **Härteprüfung nach Vickers (HV)** wird ein pyramidenförmiger Diamant als Eindrückkörper verwendet, dessen Spitze in die Probe gedrückt wird um die Vickershärte zu bestimmen.

Härtebestimmung nach Rosival = die Bestimmung des Härtegrades durch Bearbeitung des zu prüfenden Objektes mit einer bestimmten Menge eines Schleifpulvers. Dies geschieht solange, bis das Schleifmittel nicht mehr angreift. Der Gewichtsverlust ist dann das relative Maß für die Härte des Minerals, wobei ein anderes Mineral (z. B. Quarz=100) als Standard eingesetzt wird.

Die **Kristallform** mit ihren gesetzmäßig angeordneten, ebenen Begrenzungsflächen ist für jedes Mineral individuell verschieden und daher charakteristisch. Die Kristallformen lassen sich dabei in sechs Kristallsystemen erfassen: es gibt kubische, rhombische, tetragonale, hexagonale, monokline und trikline Kristallsysteme.

Die **chemische Zusammensetzung**, die Textur, ermöglicht das labormäßige Bestimmen eines Minerale.

Aber nicht allein diese drei wichtigsten, sondern zumeist erst alle Kennwerte zusammen lassen den im Mauerwerk verbauten Stein exakt bestimmen.

Tab. 3.2 Natursteine. Druckfestigkeit β_D , Biegezugfestigkeit β_{BZ} , Druck-E-Modul E_D , Schleifverschleiß – Anhaltswerte

Naturstein	β_D (N/mm ²)	β_{BZ} (N/mm ²)	E_D (10 ³ N/mm ²)	Schleifverschleiß (cm ³ /50 cm ²)
Granit, Syenit	160–240	10–20	40–60	5–8
Diorit, Gabbro	170–300	10–22	100–120	
Porphyre	180–300	15–20	20–160	
Basalt	250–400	15–25	50–100	
Basaltlava	80–150	8–12		12–15
Diabas	180–250	15–25	60–120	5–8
Quarzit, Grauwacke	150–300	13–25	50–80	5–10
Quarzitische Sandsteine	120–200	12–20	20–70	
Sonstige Sandsteine	30–180	3–15	5–30	10–30
Dichte Kalksteine, Dolomite, Marmore	80–180	6–15	60–90	15–40
Sonstige Kalksteine	20–90	5–8	40–70	35–100
Travertin	20–60	4–10	20–60	
Vulkanische Tuffsteine	5–25	1–4	4–10	20–60
Gneise, Granulit	160–280	13–25	30–80	4–10
Serpentin	140–250	25–35		5–20

Kennwerte für das Abnutzungsverhalten Gerade bei der Sanierung von altem Natursteinmauerwerk ist die Kenntnis der wichtigsten Festigkeits- und Verformungseigenschaften sowie feuchte-technischer Kennwerte in der Regel eine wesentliche Voraussetzung für den Erfolg der Instandsetzung. Deshalb erscheint es sinnvoll, Angaben über Druck- und Biegezugfestigkeit, das Druck-E-Modul und den Schleifverschleiß als Kennwert für das Abnutzungsverhalten tabellarisch aufzuliedern. Die Tab. 3.2 haben wir deshalb aus (Schubert 2001) übernommen.

Die Tab. 3.2 zeigt, dass insbesondere Tuffsteine, Travertin und Kalksteine eine relativ geringe Druckfestigkeit β_D unter 100 N/mm² und eine ebenso geringe Biegezugfestigkeit β_{BZ} von unter 10 N/mm² aufweisen. Dazu muss beachtet werden, dass der Feuchtezustand die Druckfestigkeit im Mittel um rd. 25 % verringert. Der Schleifverschleiß ist – wie zu erwarten war – bei vulkanischen Tuffsteinen und bei den sonstigen Sandsteinen recht hoch.

3.1.1 Gesteinsarten

Aus dem Gemenge verschiedener Mineralien bildeten sich im Laufe der Erdzeitalter viele verschiedene Gesteine, die sich ihrer Art nach in folgende drei Hauptgruppen zusammenfassen lassen: Magmatische, Sedimente und metamorphe Gesteine.

Magmatische entstanden bei der Bildung der Erdkruste. Sie sind die ältesten Steine. Es handelt sich um Erstarrungs- und Eruptivgesteine sowie Magmatite. Die innerhalb der Erdkruste sich bildenden Gesteine bezeichnet der Geologe als **Tie-**

fengesteine (Plutonite), dagegen solche Gesteine, welche aus von Vulkanen auf die Erdoberfläche ergossener Lava bestehen, **Ergussgesteine**. Drang Magma in Gesteinsspalten ein und kühlte hier ab, so bildeten sich **Ganggesteine**. Diese drei Gesteinsgruppen unterscheiden sich in jedem Fall ihrer Zusammensetzung durch ihr Gefüge und ihre Erscheinungsform. In historischen Mauerwerken finden sich vornehmlich die Tiefengesteine Granit, Syenit, Diorit, die älteren Ergussgesteine Quarzporphyr, Diabas und die jüngeren Ergussgesteine Basalt und Trachyt, die Ganggesteine Granitporphyr, Syenitporphyr und Dioritporphyr. Schließlich gehören zu den Ergussgesteinen auch noch die Bimssteine und Tuffe, die sich aus vulkanischer Lavaasche durch Verfestigung (Diagenese) gebildet haben.

An der Erdoberfläche unterliegen alle Magmagedesteine der natürlichen Verwitterung, die sowohl einen physikalischen oder mechanischen Gesteinszerfall als auch eine Gesteinszersetzung durch chemische Prozesse herbeiführen kann. Auch der Wachstumsdruck von Wurzeln oder ihre CO_2 -Absonderung sowie die CO_2 -Absonderung von Bakterien können Gesteine zerstören, was man als biologische Verwitterung bezeichnet hat. Die Verwitterungsprodukte verfestigten sich im Laufe von Jahrtausenden allmählich wieder, es entstanden die Sedimentgesteine.

Sedimente Bei den Sedimenten spricht man je nach ihrer Entstehungsweise zunächst von **klastischen Sedimenten** (Trümmer- und Lockergesteine), die entsprechend ihrer Korngröße als Blöcke, Gerölle, Schotter, Kies, Sand, Löss, Schluff, Lehm, Ton und Mergel vorkommen. Durch Diagenese der lockeren Bestandteile entstanden aus groben, eckigen, also wenig verfrachteten Steinen Brekzien (Brec-
cien) und aus durch den weiten Transport in Flüssen abgerundeten, groben Steinen Konglomerate. Verfestigte Sande wurden zu Sandstein; er enthält vorwiegend Quarz, daneben Feldspat, Glimmer und andere Mineralien sowie ein toniges, kalkiges oder kieseliges Bindemittel. Quarzite sind Sandsteine mit sehr viel kieseligem Bindemittel und vergleichsweise wenigen Quarzkörnern; Grauwacke besteht aus im Erdaltertum gebildeten grauem Sandstein. Durch die Verfestigung von tonhaltigen Sedimenten entwickelte sich schließlich der Tonschiefer.

Eine besondere Gruppe der klastischen Sedimente bilden die Tuffe. Tuffgesteine entstanden nicht aus Verwitterungsprodukten, sondern direkt aus Magma im Zusammenhang mit Vulkanausbrüchen und gehören eigentlich zu den Ergussgesteinen. Das lockere Produkt aus abgelagertem vulkanischem Magma wurde allerdings von Wind und Wasser umgelagert und langsam verfestigt. Die Zusammensetzung der Tuffgesteine entspricht demgemäß der des jeweiligen Magmas. Aus diesem Grunde gibt es zu jedem Ergussstein den zugehörigen Tuff. Es handelt sich also um ein vielfältig strukturiertes Steinmaterial, das eigentlich überall vorkommt.

Ausfällungsgesteine Die zweite, von den Mineralogen als Ausfällungsgesteine bezeichnete Gruppe der Sedimente entstand durch chemische Prozesse. Dabei wurden zunächst in Wasser gelöste Stoffe, die durch veränderte Bedingungen wie Temperaturanstieg oder -abnahme, Überschreiten der Sättigungsgrenze, Zugabe fällender Reagenzien und anderes mehr aus dem Wasser ausgeschieden. So entstand aus dem Kalkgehalt der Meere der Kalkstein. Er lagerte sich entweder direkt

oder indirekt über die Aufnahme durch Lebewesen, z. B. durch Meeresschnecken zu Muschelschalen verarbeitet, nach deren Absterben auf dem Meeresboden ab. Kalkstein ist deshalb häufig mit ausgefälltem und organischem Sediment vermischt, z. B. mit Schneckenhäusern oder Gebeinen fossiler Tiere wie etwa der Kalkstein aus Solnhofen mit seinen berühmten Versteinerungen, z. B. der Urvogel=Archäopterix. Vorwiegend organischen Ursprungs sind Muschelkalk, Kreide und Korallenkalk. Ausfällungskalke sind häufig mit Ton, kieseligen Ablagerungen und Dolomit vermengt, der ebenfalls im Meerwasser durch Austausch von Kalzium- gegen Magnesiumanteile in den Gesteinsmolekülen entstand: die Kalksteine „*dolomitisierten*“.

Kalkausscheidungen aus Süßwasser auf dem Festland nennt man Kalksinter. Dabei brachte die Natur entweder den lockeren Kalktuff oder den festeren Travertin hervor.

Feuerstein oder Flint besteht vorwiegend aus Chalzedon, einem mikrokristallinem Quarz; es enthält daneben oft organisch gebildete Kieselsäureabscheidungen. Salzgesteine sind rein chemische Sedimente, die beim Eindampfen von Meerwasserbuchten entstanden. Zu dieser Gruppe gehören Gips und Steinsalz.

Organischen Sedimente Die dritte Gruppe bilden die organischen Sedimente. Sie entstanden aus abgestorbenen Pflanzenteilen, die durch andere Stoffe bedeckt wurden und deshalb nicht verwest sondern vertorft sind. Durch nachfolgende Verfestigung wurde aus Torf Braunkohle, durch weitere Umwandlungsprozesse Steinkohle und schließlich Anthrazit. Bitumen bildete sich aus Fett- und Eiweißstoffen niedriger Organismen, die in sauerstofffreien Gewässern durch Fäulnisbakterien zu Faulschlamm umgewandelt wurden. Dabei können feste Kohlenwasserstoffe entstehen, die im Gestein verblieben.

Für Sedimentgesteine spielen Kennwerte wie der Benetzungswinkel, die Wasserkapazität, das Quellen und Schwinden, die Wärmedehnung, die Druckfestigkeit des trockenen Gesteins und die Biegezugfestigkeit eine große Rolle. Diese Werte sind bei der Untersuchung am beschädigten, historischen Mauerwerk von entscheidender Bedeutung.

Wenn sich der auf die Gesteine wirkende Druck und die Temperatur erhöhen oder dieselben mit Schmelzen, Lösungen und Gasen zusammenkommen, können sowohl Magma- als auch Sedimentgesteine in gänzlich andere Gesteine umgewandelt werden: es entstehen **metamorphe Gesteine**. Je nach Art der Metamorphose entstanden **kristalline Schiefer, Kontaktgesteine und Mischgesteine**.

Zur Gruppe der kristallinen Schiefer gehören Gesteine wie die aus der Metamorphose des Kalk entstandenen Marmor, Glimmerschiefer und Quarzit. Bei noch höheren Drücken und Temperaturen bildet sich Gneis, das am weitesten verbreitete Gestein der kristallinen Schiefer.

3.1.2 Bautechnisch wichtige Natursteine

Um das in einem historischen Mauerwerk verwendete Steinmaterial erkennen und bestimmen zu können, sollen hier besonders häufig eingesetzte Natursteine näher beschrieben werden (Grimm 1990). Zunächst seien die **Tiefengesteine** betrachtet.

Abb. 3.1 Burg auf Fehmarn,
Pfarrkirche. Granitsockel



3.1.2.1 Tiefengesteine

Tiefengesteine wurden wegen ihrer Wetterbeständigkeit hauptsächlich als Bruch- oder Werksteine für Fundamente, Sockelmauerwerk, Pfeiler, Widerlager, Unterlagsteine, Stützmauern oder Stufen zumeist im Freien verwendet. Die Steine lassen sich außerdem fein polieren, zu Platten schneiden und können dann als Wandverkleidung, Bodenbeläge, Säulen an Fassaden sowie Tür- und Fensterverdachungen eingesetzt werden.

Granit besteht aus Feldspat, Quarz und Glimmer, selten auch Hornblende und Augit. Seine Farbe wird vom jeweils vorherrschenden Mineral bestimmt: Kalifeldspat ist rötlich, andere sind milchig-weiß bis hellgrau-gelblich; Quarz dagegen ist weißlich-grau, Kaliglimmer silbrig, Magnesiaglimmer grauschwarz, mit Quarz vermischt ergibt sich ein Bild wie „Pfeffer und Salz“. Aus Granit wurden wegen ihrer schweren Bearbeitbarkeit sehr häufig nur Turmunterbauten wie an der evangelischen Nikolaikirche in Burg auf der Insel Fehmarn, Fundamente der Chormauern wie in der Marienkirche in Bad Segeberg oder Granitquaderverblendung von Tuffmauern am romanischen Südquerarm des Doms in Schleswig ausgeführt. In große Platten geschnitten und fein poliert dient er heute noch als Außenhaut moderner Gebäude oder als Bodenplattenbelag (Abb. 3.1).

Beständiger Granit ist feinkörnig und gleichmäßig im Korn. Wenn Granit infolge Oxidation von Eisenverbindungen gelb bis braun verfärbt wurde, die Feldspatkris-

talle ihren Glanz verloren haben oder einzelne Kristalle lose im Gefüge liegen, so ist der Granit angewittert. Mit schnell fortschreitender weiterer Verwitterung muss dann gerechnet werden.

Hauptvorkommen Riesengebirge, Lausitz, Erzgebirge, Bayerischer Wald, Oberpfälzer Wald, Fichtelgebirge, Harz, Odenwald, Schwarzwald, Vogesen.

Syenit besteht aus rotem Kalifeldspat und Hornblende. Quarz kommt kaum vor. Er ist wesentlich weniger spröde wie der Granit. Seine Farbe wechselt von grauroten über dunkelgrüne und dunkelgraue bis hin zu schwarzen Tönen.

Hauptvorkommen Lausitz, Oberpfälzer Wald, Fichtelgebirge.

Diorit besteht aus weißlich-glasigem Kalknatronfeldspat und dunkler Hornblende, meist mit Biotit oder Augit und selten noch etwas Quarz. Der Stein ist nicht spröde, aber sehr zäh, und von dunkelgrüner Farbe. Wegen seiner geringen Wasseraufnahmekapazität von $\leq 1,0$ Volumenprozent findet man ihn oftmals als Baustoff für historische Kellerwände.

Hauptvorkommen Oberpfälzer Wald, Thüringer Wald, Kyffhäuser, Odenwald, Schwarzwald, Vogesen.

3.1.2.2 Ergussgesteine

Ergussgesteine wurden zumeist als Sockel- oder Kellermauerwerk und für Stützmauern eingesetzt. In Hessen (Vogelsbergkreis), in der Rhön, im Westerwald und in der Eifel wurden Fachwerkhäuser mit Basaltsteinen ausgefacht, aber auch komplettte Hauswände in Bruchsteinmauerwerk aus Ergussgesteinen erstellt.

Basalt besteht hauptsächlich aus Feldspat und Augit, ist meist quarzfrei. Seine Farbe ist dunkelgrau bis schwarz. Der Stein ist sehr dicht, zeigt einen splittrigmuscheligen Bruch, ist aber kaum zu bearbeiten. Der für Mauerwerk eingesetzte Basaltbruchstein hat zumeist ein gleichmäßiges, glasfreies Gefüge und ist sehr witterfest. Basalt kann jedoch infolge von „Sonnenbrennen“ zerfallen. Einschlüsse von Nephelin wandeln sich in der Sonne mit Hilfe von Feuchtigkeit in das Mineral Analcim um. Mit dieser Metamorphose ist eine Volumenvergrößerung verbunden, die schließlich zu Rissen im Stein und zu dessen Zerfall führt (Abb. 3.2).

Hauptvorkommen Erzgebirge, Hessen, Rhön, Vogelsberg, Westerwald, mittleres Rheintal, Eifel.

Diabas und **Melaphyr** entsprechen dem Basalt. Diabas besteht aus Plagioklas und Augit, manchmal enthält er auch Quarz oder Olivin. Sein Bestandteil Augit ist oftmals in Chlorit umgewandelt, was ihn grünlich aussehen lässt. Man nennt ihn dann Grünstein. Die Farbe ist normalerweise dunkel bis schwarz. Der Stein ist sehr dicht und polierfähig. Melaphyr ähnelt dem Diabas, ist aber von grünschwarzer bis schwarzer Farbe. Ihrer geringen Saugfähigkeit wegen hat man sie schon immer für Mauerwerk im nassen Baugrund eingesetzt.

Hauptvorkommen des Melaphyr: Sachsen (Zwickau), Thüringer Wald, Harz, Saar-Nahe-Gebiet.

Hauptvorkommen des Diabas: Lausitz, Fichtelgebirge, Harz, Siegerland, Sächsische Schweiz (Pirna).

Abb. 3.2 Alsfeld. Wohnhauswand aus Basaltmauerwerk



Trachyt ist ein quarzfreies, jungvulkanisches Ergussgestein von hellgrauer bis bräunlicher Farbe. Es ist bei weitem nicht so fest wie die anderen Ergussgesteine. Der Stein ist gut bearbeitbar, aber nicht polierbar, freilich nur dann wetterbeständig, wenn er sehr wenige Bestandteile an leicht verwitterndem Feldspat (Sanidin) enthält. Wetterbeständige Trachyty sind die dunklen, hornblendereichen, nicht aber die hellen Sorten, wie sie am Kölner Dom zum Einsatz gelangten. Trachyttuffe sind meist sehr weich. Zu ihnen gehört der Trass; Bims ist ein aufgeschäumter Trachyt. Insbesondere der Trass besaß als hydraulische Zugabe zu Mauermörtel schon seit jeher ein weites Einsatzgebiet.

Hauptvorkommen Westerwald, Siebengebirge, Eifel.

Die Ganggesteine **Porphy** und **Keratophy** wurden wie Granit verbaut.

Hauptvorkommen Sachsen, Thüringer Wald, Odenwald, Schwarzwald.

3.1.2.3 Sedimentgesteine

Sedimentgesteine sind die für den Mauerwerksbau wichtigste Gruppe. Die meisten historischen Mauern wurden aus diesen Natursteinen errichtet. Deshalb stehen die Sedimentgesteine im Mittelpunkt der Überlegungen bei der Instandsetzung von Natursteinmauerwerk.

Sandstein Sandstein gehört zu den klastischen Sedimentgesteinen. Er ist umso besser, je feiner und gleichmäßiger sein Korn. Seine Eigenschaften werden allerdings hauptsächlich durch die den Sand zusammenhaltenden Bindemittel bestimmt: Toniges Bindemittel verleiht dem Stein mangelhafte Eigenschaften; es sorgt in der Regel für eine geringe Festigkeit und, da dieses Bindemittel außerdem wasseraufnahmefähig ist, für eine genauso geringe Frostbeständigkeit. Nur wenn neben dem tonigen ein kieseliges Bindemittel vorhanden ist, hat der Stein die nötige Wetterfestigkeit. Überwiegt gar das kieselige Bindemittel, dann ist der Sandstein ein festes und witterungsbeständiges Baumaterial, das sich bestens für Mauerwerke eignet und schon immer geeignet hat. Wir finden ihn deshalb beispielsweise im Mauerwerk der deutschen Dome. Die kalkigen, dolomitischen oder mergeligen Bindemittel machen die Sandsteine dagegen empfindlich gegen chemische Angriffe, z. B. gegen sauren Regen, Rauch aus den Kohle- oder Ölöfen der Altstädte oder Industrieabgase. Jene Sandsteine sind zudem nicht feuerbeständig. Schließlich enthält ferritischer Sandstein Braun- oder Roteisen. Ganz besonders schädlich für den Stein aber sind Bestandteile wie hervortretende Ton-, Glimmer-, Brauneisen- und Schweißkieseinschlüsse, überaus nachteilig ist leicht verwitternder Glimmer, vor allem dann, wenn er schichtenweise abgelagert ist. Die verwitternden Glimmerschichten treiben den Sandstein auseinander und zerstören ihn damit nachhaltig.

Die Bindemittel und die Mineralführung bestimmen die Farbe des Sandsteins: weißer Sandstein ist kieseläure- und kalkhaltig, rotgelber bis brauner enthält Brauneisen (Limonit), roter ferritischer Sandstein Roteisen (Hämatit), grüner Glaukonit und Chlorit, schwärzlicher Manganoxide und schließlich grauer bis schwarzer, karbonatischer Sandstein organische Bestandteile wie Kohle.

Der Wasseranteil im Sandstein soll beim Vermauern nicht über 9 %, bei sehr tonigen Sandsteinen nicht über 7 % des Trockengewichtes betragen. Wenn er höher gewesen ist, dann zeigt der austrocknende Stein starke Schwinderscheinungen wie Risse, klaffende Fugen und ähnliches, wie unser Beispiel Oberdachstetten (Abb. 1.1) gezeigt hat. Damit geht zudem ein Verlust an Tragfähigkeit einher. Ein guter Sandstein zeichnet sich freilich dadurch aus, dass selbst bei einem Durchfeuchtungsgrad von 100 % seine Härte nicht wesentlich nachlässt.

Für alle Bauwerke wurden in der Vergangenheit Sandsteinarten je nach dem Vorkommen am Standort vermauert. Im Raum Stuttgart findet sich *Fleinsstein*, ein fein- bis mittelkörniger, kieseliger, dunkelgrauer Sandstein, der sehr hart ist, im Ruhrgebiet *Kohlen- oder Ruhsandstein*, ebenfalls ein fein- bis mittelkörniger, kieselig-toniger, im allgemeinen sehr harter und witterbeständiger Sandstein von blaugrauer bis gelblicher Farbe. Das Münster in Essen wurde aus Ruhsandstein erbaut. *Dyassandstein* setzt sich aus Körnern von Quarz, Hornstein d. i. mikro- oder feinkristalliner Quarz, Kieselschiefer mit tonig-kieseligen Bindemitteln zusammen. Nur bei geringem Tongehalt ist der gelbe bis rote, manchmal auch weiße bis grünlichgraue Stein hart, gut witterbeständig und deshalb als Mauerstein zu gebrauchen.

Am häufigsten wurde *Buntsandstein* vermauert, denn er kommt fast in ganz Deutschland vor. Es handelt sich um einen fein- bis mittelkörnigen, kieselig-to-

Abb. 3.3 Würzburg, Rathaus. Die gesamte Altstadt besteht aus rotem Mainsandstein

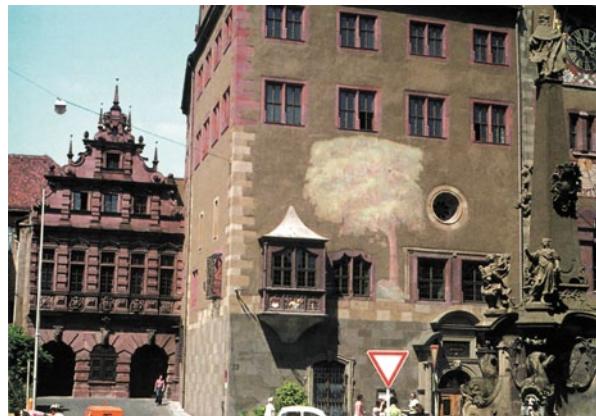


Abb. 3.4 Nürnberg, Dürerhaus. Sandsteinerdgeschoss



nigen, gelbbraunen bis roten, aber auch weißlichgrauen bis grünlichen, oft streifigen oder geflammteten Stein. Besonders bekannt ist der rote Mainsandstein aus dem Spessart, aus dem der Würzburger Dom und die meisten historischen Gebäude der Stadt Würzburg und der anderen Städte am Main entlang errichtet worden sind (Abb. 3.3).

Auch die Nürnberger Burg steht auf Buntsandsteinfelsen, deshalb prägt auch diese Stadt weitgehend roter Buntsandstein (Abb. 3.4).

Aber auch die Mauern des Wormser Domes bestehen aus einem solchen Material. Der Bamberger Dom dagegen besteht aus *Schilf- und Rätsandstein*, wobei der meist feinkörnige Schilfsandstein mit tonigen oder dolomitischen Bindemitteln häufig schilfähnliche Pflanzenabdrücke, meist von Schachtelhalmen, aufweist. Seine Farbe ist braunrot, graugelb oder graugrün. Hauptfundorte sind Kitzingen, Heilbronn, Stuttgart, aber auch die Hassberge in der Nähe Bamberg's, oder der Hildesheimer Raum, wo die Kreuzkirche in Hildesheim aus Schilfsandstein errichtet worden ist. Dem Schilfsandstein ist der *Blättersandstein* bei Mainz sehr ähnlich. Der fein- bis grobkörnige, meist gelbliche *Rätsandstein* ist sehr hart und wird sowohl in

Oberschwaben als auch im Coburger Raum abgebaut. Der fein- bis mittelkörnige, kieselige, sehr harte und damit wetterfeste *Liassandstein* ist meist hellgrau. Seine Fundorte erstrecken sich von Luxemburg, über Porta Westfalica sowie über ganz Mittel- und Süddeutschland. Fein- bis grobkörniger, grauer bis gelbbrauner *Angulatensandstein* meist mit kalkig-eisenhaltigen Bindemitteln findet sich südöstlich von Stuttgart. Er ist leicht spaltbar und wurde deshalb in der Regel nur als Bruchstein vermauert. In Baden und in der Rheinpfalz steht gelbbrauner bis dunkelroter, feinkörniger, jedoch glimmer- und eisenhaltiger, daher in der Regel zu weicher und nicht wetterfester *Doggersandstein* an. Trotzdem wurde mit ihm z. B. die Torbastei in Lauchheim-Kapfenburg in Baden-Württemberg gebaut. Obwohl sich der mergelige *Molassesandstein* aus dem Alpenvorland zum Bauen nur bedingt eignet, wurde er im Bodenseeraum für Mauerwerk eingesetzt.

Eisenhaltiger *Rotsandstein* und glaukonithaltiger *Grünsandstein* sind jeweils nach ihrer Farbe benannt. Es handelt sich dabei aber um sehr festes, fein- bis mittelkörniges, zum Bauen sehr gut geeignetes Buntsandsteinmaterial, das sowohl in Bayern als auch in Westfalen vorkommt. Leider ist dieses Material sehr anfällig für chemische Zerstörung durch Abgase und Rauch. Die Alte Pinakothek in München und der Regensburger Dom wurden mit Regensburger bzw. Abbacher Grünsandstein errichtet und zeigen ihre Anfälligkeit für CO₂ enthaltende Abgase.

Zu den Buntsandsteinen zählen auch die sog. „*Solling*“-Platten, die aus einem dünne Platten bildendem und daher leicht spaltbarem, meist glimmerhaltigem Rotsandstein des Weserberglands bestehen. Dieser Stein wurde dort zwar auch zum Mauern, aber weitaus öfter ähnlich wie Dachziegel zur Dachdeckung verwendet.

Für die Denkmalinstandsetzung im norddeutschen Raum wird zunehmend *Oberkirchner Sandstein* aus dem Bückeburger Raum eingesetzt. Es handelt sich um feinkörniges, gelblichgraues, sehr witterungsbeständiges Material. Die Mauern des Opernhauses in Hannover sind aus jenem Stein gebaut worden. Das Mauerwerk des Kölner Domes und des Ulmer Münsters bestehen dagegen aus *Schlaitdorfer Sandstein*, dessen überwiegend dolomitisches, manchmal auch kieseliger oder toniges Bindemittel ihm eine schlechte Wetterbeständigkeit verleiht, denn er saugt bis zu 12 Vol.% Wasser auf (s. Tab. 3.3).

Steine aus graubrauner bis grauschwarzer *Grauwacke*, ein erdgeschichtlich sehr alter, kieseliger Sandstein, oft mit Einschlüssen aus Brocken verschiedener Gesteine behaftet, sind sehr hart und mit Werkzeug kaum zu bearbeiten. Deshalb wurde Grauwacke fast nur in unregelmäßigem Bruchsteinmauerwerk vermauert. Dieser Naturstein kommt insbesondere im Harz, im Edertal, im Rheinland und in der Lauter- sitz vor.

Zur großen Gruppe der Sandsteine gehören auch *Konglomerate* und *Brekzien*. Jene bestehen aus abgerollten Gesteinstrümmern z. B. *Nagelfluh*, diese aus kantigen Gesteinsbrocken. Sie sind wie grober Sandstein durchaus als Bausteine geeignet und wurden zumeist in Sockelmauerwerk verwendet, z. B. an der Frauenkirche in München. Für Grundmauern wurde manchmal auch der kristalline *Quarzit* eingesetzt, ein weißes bis hellgraues, sehr hartes und nicht mörtelbindendes Steinmaterial.

Tab. 3.3 Porosität, Dichte und Wasseraufnahme einiger für Mauerwerk verwendeter Natursteine. (Die Kenndaten stammen aus: Weber (1985); Lucas, Knöfel)

Gesteinsart	Porosität (Vol.-%)	Dichte ($10^3/\text{kg/m}^3$)	Wasseraufnahme DIN 52 103 (Vol.-%)
Hellgrauer dichter Felsengips aus der Windsheimer Bucht	2	2,28–3,1	0,8
Roter fester Schiffsandstein	18,3	2,11	17,0
Köln, Schlaitsdorfer Sandstein	12–17	2,15	8–12
Abbacher Grünsandstein	17–23	2,13	12–17
Quarzitische Sandsteine	0,5–25	2,64–2,72	0,5–24
Vulkanische Tuffsteine	20–30	2,62–2,75	12–30
Granit/Syenit	0,4–1,5	2,62–2,85	0,4–1,4
Basalt	0,2–0,9	3,00–3,15	0,2–0,8
Diabas	0,3–1,1	2,85–2,95	0,3–1,0
Quarzit/Grauwacke	0,4–2,0	2,64–2,68	0,4–1,3
Travertin	5,0–12	2,69–2,72	4,0–10

Gipsstein bzw. Anhydrit Gipsstein bzw. Anhydrit wurde früher häufiger als Werkstein für Mauerwerke oder für Füllungsmassen in zweischaligem Mauerwerk insbesondere im Windsheimer Becken und in Norddeutschland (Segeberger Gips) verwendet. Seine geringe Härte – der Stein kann mit dem Fingernagel geritzt werden (s. Tab. 3.2) – und seine Wasserlöslichkeit machen ihn heute als Werkstein unbrauchbar. Eine Abart des Gipssteins ist *Alabaster*. Er ist marmorartig gefärbt und lässt sich sehr gut polieren. Deshalb wurde er in sehr aufwendigen Räumen als schmückende Wandbekleidung, z. B. im Alabastersaal des Berliner Stadtschlosses des großen Kurfürsten Friedrich Wilhelm, eingesetzt (Wiesinger 1989).

Kalkstein Zu den Kalksteinen gehören auch Magnesit und Dolomit. Die gewöhnlichen Kalksteine wurden wegen ihrer Wetterbeständigkeit und Härte sehr häufig als Werksteine vermauert. Ihre Farbe wechselt jeweils mit den Anreicherungen: reiner Kalkstein ist weiß, durch Eisenoxid wird er gelblich bis rotbraun, durch Eisenchlorit grau und schließlich färbt ihn ein Gehalt an Kohle grau bis schwarz (Abb. 3.5).

Zu den Kalksteinen gehören auch die „*Solnhofer Platten*“, die aus leicht spaltbarem, sehr dichtem Jurakalk gewonnen werden. Es handelt sich um ein in unterschiedlichen, zumeist geringen Schichtdicken abgelagertes Sedimentgestein, das häufig Versteinerungen aufweist. Historisch wurden Solnhofer Platten als Dachdeckung, ähnlich wie die Solling-Platten, im Altmühltaal und in Eichstätt verwendet. Außerdem haben die Baumeister zu allen Zeiten dieses Material als Fußbodenplatten eingesetzt. Im aufgehenden Mauerwerk fand das Gestein als Treppenstufen, Fensterbänke oder Abdeckplatten Anwendung (Abb. 3.6).

Zur Bereicherung historischer Gebäude trug wesentlich der *Marmor* bei. So nannte und nennt man noch heute alle polierfähigen Kalksteine. Unter dem echten Marmor versteht man freilich nur kristalline, metamorph entstandene Kalksteine, deren Kanten Licht durchscheinen lassen. Auch Marmor diente in historischen Gebäuden grundsätzlich nur als Wandverkleidung und Bodenplatten. Reiner Marmor

Abb. 3.5 Limburg, Domburg. Häuser aus Kalksteinmauerwerk



Abb. 3.6 Ansbach, Residenzschloss. Barocke Treppe im Osteck aus Solnhofener Marmor



ist weiß, z. B. Carrara-Marmor aus der Toskana in Italien. Durch Eisenoxid wird er rot, durch Eisenhydroxit gelb bis braun, durch Eisensulfid, Graphit oder Kohle bläulich bzw. grau bis schwarz, durch Chlorit, Olivin, Serpentin oder Glaukonit grün gefärbt. Die den Marmor färbenden Mineralien haben sich im Kalkstein in unregelmäßigen Bändern oder Schleieren abgelagert und „marmorieren“ infolgedessen den fein geschliffenen Kalkstein (Abb. 3.7).

Gneis ist ein weiteres metamorphes Gestein. Er wurde wegen seiner schweren Bearbeitbarkeit für Bruchstein- und Stützmauern im Freien, aber auch für Boden- und Wandverkleidungen eingesetzt. Gneis ist zwar zumeist polierfähig, wurde aber fast immer roh eingesetzt.

Hauptvorkommen Riesengebirge, Erzgebirge, Bayerischer Wald, Fichtelgebirge, Thüringer Wald, Spessart, Odenwald, Schwarzwald, Vogesen.

Bei **Dachschiefer** handelt sich um umgewandelten Tonschiefer, der im Laufe langer geologischer Zeiträume durch Hitze entwässert und silikatisiert wurde. Der Schiefer wurde immer nur als Dachdeckung oder Wand- und Bodenverkleidung eingesetzt und spielte für das historische Mauerwerk keine Rolle (Abb. 3.8).

Lehm Bereits in der Antike wurde Lehm hauptsächlich für untergeordnete Mauern als Baustoff eingesetzt. Er besteht in der Hauptsache aus Gesteinsschluff und Feinsand, durchsetzt mit stark verwitterten, dabei entkalkten und durch Oxydation von

Abb. 3.7 Ansbach, Residenzschloss, Marmorkabinett. Der Sockel der Wand ist echter Marmor, die übrige Wand besteht aus Stuckmarmor



Abb. 3.8 Fulda, Dom, Seitenkapelle. Türmchen mit Schiefer gedeckt



Eisen braun gefärbten, tonigen Bestandteilen, den Tonmineralen. Tonminerale sind sehr weich – Mohs-Härte 1 – und reagieren plastisch auf mechanische Beanspruchung (s. Tab. 3.1). Sie wandeln sich beim Erhitzen in härtere und festere Minerale um, was man bei der Herstellung von Backsteinen oder Keramik nutzt. Tonminerale besitzen eine große spezifische Oberfläche, an die Stoffe, etwa Sandkörner, zunächst absorbiert bzw. angelagert und später wieder desorbiert bzw. abgegeben werden können. Tonminerale haben außerdem eine geringe Wasserdurchlässigkeit. Suspensionen von Tonmineralen reagieren thixotrop, das bedeutet, je länger man eine thixotrope Flüssigkeit umröhrt, desto dünnflüssiger wird sie.

Ton ist das natürliche Bindemittel im Lehm, daher ist die Bindekraft eines Baulehms von Art und Anteil der Tonminerale abhängig. Je nach ihrer Bindekraft bezeichnet der Handwerker den Baulehm als „*mager*“ oder „*sett*“ (Tab. 3.4).

Lehmbaustoffe mussten zu allen Zeiten zunächst aufbereitet werden. Dabei wurden dem Lehm Zuschlagstoffe und Wasser zugegeben. Wegen der großen spezifischen Oberfläche der Tonminerale ist Lehm in der Lage, viel Wasser aufzunehmen.

Tab. 3.4 Einteilung der Baulehme nach der Bindekraft.
(Nach DIN 18 952-2)

Benennung	Bindekraft (g/cm^2)
Sehr mager	50–80
Mager	>80–110
Fast fett	>110–200
Fett	>200–280
Sehr fett	>280–360
Ton	>360

Tab. 3.5 Schwinden der Baulehme

Benennung	Längenschwindung (%)
Magerer Lehm	1–2,5
Fast fetter Lehm	2–3,5
Fetter Lehm	3–5
Sehr fetter Lehm	4–10

Tab. 3.6 Wärmeleitfähigkeit von Lehmbaustoffen

Lehmbaustoff	Kurzbezeichnung	Rohdichte ρ (kg/m^3)	Wärmeleitfähigkeit λ [$\text{W}/(\text{m K})$]
Schwer- oder Stampflehm	STL	2.000–2.400	1,20
Lehmsteine und Lehmformlinge	LS	1.700–2.200	0,95–1,20
Strohlehm, Faserlehm, Wellerlehm	SL, FL, WL	1.200–1.700	0,60–0,80
Leichtlehm und Lehmwickel	LL	300–1.200	0,30–0,50
Lehmwickel mit Stroh auf Holzstaken	WL	150–300	0,50

Beim Trocknen schwindet deshalb der Lehm stark. Die Baulehme werden aufgrund ihres Trockenschwindverhaltens nach DIN 18 952–2, Ausgabe: Oktober 1956 – *Lehmbau/Baulehm, Prüfung Baulehm* wie in Tab. 3.5 bezeichnet.

Lehm war, wie bereits dargestellt, als Baustoff für Mauern früher vor allem im ländlichen Bereich weitverbreitet. Heute kommt er im Zuge des „ökologischen Bauens“ wieder verstärkt zum Einsatz.

Die Zuschlagstoffe bestimmen die Wärmeleitfähigkeit λ [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$] von Lehmbaustoffen. Sie korreliert mit der Rohdichte ρ in kg/m^3 , d. h. je dichter der Lehm ist, desto größer sein Wärmeleitvermögen. Dieses Faktum hatten bereits die Zimmerleute und die für den Einbau von Lehm in das Gefach verantwortlichen Kleiber in der Vergangenheit gekannt und haben für Gefache nur Strohlehm oder Lehmwickel mit Stroh, beides auf Holzstaken, eingesetzt. In der DIN V 4108–4 vom Februar 2002 – *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte* wurden Werte zur Wärmeleitfähigkeit für Lehmbaustoffe veröffentlicht gemäß unserer Tab. 3.6.

Zwischen Ton und Lehm gibt es keine scharfe Grenze: Allgemein enthält Ton Teilchen kleiner als 0,002 mm Korngröße, Lehm dagegen sehr ungleiche Korngrößen, vom Schluff bis zum Kies mit Korngrößen bis etwa 20 mm. Der Tonanteil

bestimmt darüber hinaus die Plastizität des Baulehms. Alle Lehme quellen bei Wasserzugabe und schwinden beim Trocknen, wiederum in Abhängigkeit vom Tongehalt. Die Trockenschwindung ist sehr hoch und beträgt bei gestampftem Lehm etwa 2 %.

Baulehm konnte so, wie er in der Natur vorkam, als Baustoff verwendet werden. Er wurde aber wegen seiner starken Schwind- und Quelleigenschaft zumeist mit Zuschlägen vermischt. Der Tonanteil wirkt dabei als Bindemittel und bewirkt die Klebekraft des Lehms. Nichttonige Bestandteile wie Sand vermindern als Zuschläge das Schwindmaß beim Trocknen, faserige wie Stroh, Holzspäne, dünnes Gezweig und ähnliches verbessern den Zusammenhalt.

Baulehm ist gegen Wasser sehr empfindlich und verliert, wenn er nass wird, seine Festigkeit. Daher musste er zu allen Zeiten während der Bauarbeiten gut gegen Nässe geschützt werden. Auch nach der Fertigstellung von Lehmmauerwerk ist ein dauerhafter Schutz vor Durchfeuchtung unabdingbar notwendig. Baulehm ist außerdem frostempfindlich und konnte immer nur in der frostfreien Zeit des Jahres verarbeitet werden. Da in früheren Jahrhunderten die Winterzeit wesentlich längere Frostperioden als heutzutage aufwies, konnte Lehmmauerwerk nur in den Monaten zwischen Mai und September hergestellt werden.

Die wichtigsten Eigenschaften von Lehm

- gute Bindekraft verbunden mit hoher Zugfestigkeit im plastischen Zustand
- niedrige Biegezug- und Druckfestigkeit
- hohes Trockenschwindmaß
- hohe Wasserdampfdiffusion
- hohe Sorptionsfähigkeit
- hohe kapillare Leitfähigkeit

3.2 Keramische Baustoffe

Im Zusammenhang mit dem Mauerwerk interessieren vor allem die aus Lehm gebrannten Baustoffe **Backstein**, **Mauerziegel** und **Klinker**. Dachziegel, Deckenziegel, Steinplatten und Steinzeug sollen unberücksichtigt bleiben. Im Zusammenhang mit der Entwicklungsgeschichte des Backsteins wurden bereits die Formate des historischen Backsteins dargestellt (s. Kap. 2.2.7).

3.2.1 Bestandteile der keramischen Baustoffe

Wesentlicher Bestandteil aller keramischen Baustoffe ist Ton (Scholz 1999). Die Tonminerale bestehen überwiegend aus Aluminiumsilikaten, denen Hydratwasser

Tab. 3.7 Brenntemperaturen von keramischen Stoffen

Alte Backsteine	600–800 °C
Moderne Ziegelware	900–1.100 °C
Steinzeug, Klinker	1.150–1.300 °C
Feuerfeste Steine	1.300–1.800 °C

angelagert ist. Der Wasserverlust beim Trocknen und Brennen führt zum Schwinden mit teilweise beträchtlicher Volumenverminderung. Lehm, eine Mischung von Ton und Sand, sowie Mergel, der Kalk enthält, sind die Grundstoffe für ungebrannte und gebrannte Ziegel, Grobkeramik und Lehmabauweisen.

Die Farbe des Brenngutes wird durch geringe Beimengungen von Metalloxiden bestimmt. Für Ziegel ist die rote Farbe charakteristisch, weil das braune Eisen-Oxidhydrat in vielen Sedimenten zu finden ist. Es verliert beim Brennen das Wasser und wird in das rote Eisen-Oxid überführt. Ist neben Eisen auch Kalk vorhanden, entsteht beim Brand eine gelbe Ziegelfarbe. Außerdem kann man durch verschiedene Zugaben, z. B. Mangan oder Graphit, die Farbigkeit der Ziegel verändern (Tab. 3.7).

3.2.2 Industriell gefertigte Mauerziegel

Die heutigen, industriell gefertigten Mauerziegel sind in der DIN 105 zusammengefasst: (Scholz et al. 1999)

- Teil 1 Vollziegel und Hochlochziegel, einschl. Vormauerziegel, Klinker und Mauertafelziegel
- Teil 2 Leichthochlochziegel
- Teil 3 Hochfeste Ziegel und hochfeste Klinker
- Teil 4 Keramikklinker
- Teil 5 Leichtlanglochziegel und Leichtlanglochziegelplatten

Bis heute gibt es eine Vielzahl von Neu- und Weiterentwicklungen des Mauerziegels, deren Verwendbarkeit durch allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen nachgewiesen ist. Ein umfangreiches Verzeichnis dieser neuen Baustoffe wurde im Mauerwerk-Kalender 2009 veröffentlicht (Hirsch). Diese Baustoffe, z. B. Poroton, sind freilich in der Regel für den Neubau vorgesehen.

Für den Ersatz alter, nicht mehr zu reparierender Wände aus Mauerwerk sind insbesondere die Plan- bzw. Leichthochlochziegel mit integrierter Wärmedämmung, aufgemauert mit Leichtmörtel LM 21 geeignet. Mit ihrem λ -Wert = 0,080 W/m K lassen sich die strengen Anforderungen der derzeit geltenden Energieeinsparungsverordnung EnEV 2009 erfüllen. Ihre Steinkammern sind zumeist mit Mineralfasern oder mit einem Dämmstoff aus gebundenem, hydrophobiertem Perlite-Leichtzuschlag gefüllt (Abb. 3.9).

Die Eigenschaften des modernen Mauerziegels sind in einer Vielzahl von Fachbüchern leicht zugänglich dargestellt und werden deshalb hier nicht mehr wiederholt (s. dazu z. B. den Mauerwerk-Kalender). Festzustellen bleibt aber, dass heutzutage ein wesentlich reicheres Ziegelmaterial hergestellt wird als zuvor. Der

Abb. 3.9 Ohne Regenschutz aufgestapelte Porotonsteine saugen schnell viel Wasser



moderne Mauerziegel besitzt zudem wegen seiner durch Chemiker überwachten industriellen Herstellung eine durchgehend gewährleistete Qualität, die der historische Backstein niemals erreichte. Außerdem wird modernes Mauerwerk noch selten nachträglich instandgesetzt und kann deshalb erst in den kommenden Jahren ein Thema für die Instandhaltungspraxis werden (Schubert 2001).

3.3 Mineralisch gebundene Baustoffe

Seit der industriellen Fertigung von Beton-Werksteinen und -Dachsteinen in der Mitte des 19. Jahrhunderts gehören insbesondere die Werksteine aus Beton ebenfalls bereits zum historischen Mauerwerk. Später kamen Mauersteine und Hohlblocksteine aus Beton, Kalksandsteine und jüngst die bereits dargestellten Porenbetonsteine hinzu.

3.3.1 Betonwerk- und -Mauersteine

Für historisches Mauerwerk sind auch die Betonwerksteine immer wieder ein wesentliches Element der Gestaltung, wie bereits in der Geschichte der Naturwerksteine dargestellt. Die Betonwerksteine wurden außerdem seit dem Ende des 19. Jahrhunderts mit Baustahl bewehrt, aber in der Regel wie Naturwerksteine vermauert. Meist finden sich allerdings nur Betonwerksteinteile innerhalb eines Ziegelmauerwerks, ganze Wände wurden äußerst selten mit Werksteinen aufgemauert, sondern in der Regel gleich betoniert. Bei ihrer Instandsetzung greift man auf die in der Betontechnologie entwickelten Methoden zurück. Deshalb können sie im Zusammenhang mit der Mauerwerksinstandsetzung unberücksichtigt bleiben (Abb. 3.10).

Abb. 3.10 Leipzig, Endersstraße. Klinkerfassade mit Betonwerksteinen



Die Betonmauersteine werden zumeist aus Leichtbeton hergestellt und passen sich im Format an die Mauerziegel an. Als Leichtzuschläge werden vor allem Naturbims, Lavaschlacke, Blähton, Hüttenbims und Ziegelsplitt verarbeitet. Der Hohlblockstein aus Leichtbeton findet sich wegen seiner geringen Herstellungskosten seit dem ersten Viertel des 20. Jahrhunderts in Deutschland besonders an untergeordneten Bauten. Er war z. B. bei der Errichtung landwirtschaftlicher Betriebsgebäude weit verbreitet und ist es noch immer. Außerdem hat man Formsteine aus Leichtbeton insbesondere für den Kaminbau entwickelt. Schadhaftes Mauerwerk aus Betonhohlblock- bzw. Betonformsteinen wird zumeist abgebrochen und durch neues ersetzt (Abb. 3.11).

3.3.2 Porenbetonsteine

Die Herstellung von Porenbetonsteinen erfolgt seit mehr als 50 Jahren statio-när in Porenbetonwerken in einem industriellen Verfahren. Quarzhaltiger Sand, Zusatzstoffe, Bindemittel, Treibmittel und Wasser sind die erforderlichen Rohstoffe für Porenbetonsteine. Der Sand wird zementfein oder zu Schlämmen gemahlen. Als Bindemittel verwendet man Branntkalk oder Zement. Feines Aluminiumpul-ver dient als Porosierungsmittel. Die feingemahlenen Grundstoffe werden zu ei-

Abb. 3.11 Betonformsteine werden zur Herstellung von Kaminen verwendet



nerwässrigen Suspension gemischt und in Gießformen gefüllt. Das Wasser löscht unter Wärmeentwicklung den Kalk, das Aluminium reagiert mit der alkalischen Flüssigkeit und setzt dabei gasförmigen Wasserstoff frei, der die Poren bildet und ohne Rückstände entweicht (Scholz et al. 1999).

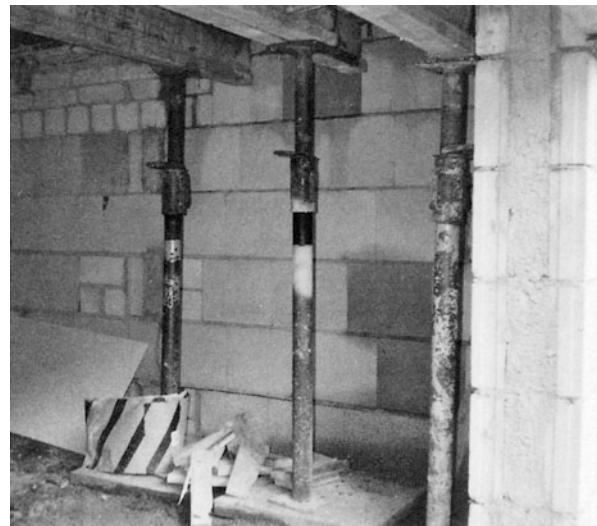
Wegen seiner guten Wärmedämmeigenschaften und seinem geringen Gewicht lässt sich Porenbeton einerseits zur Instandsetzung von Fachwerkausfachungen einsetzen, andererseits eignet er sich grundsätzlich als Hintermauerung von zu dünnen, steinernen Mauern, um deren Wärmedämmung zu verbessern, wenn eine Wärmedämmung an ihrer Außenseite nicht in Frage kommt. Selbstverständlich wird schadhaftes Porenbetonmauerwerk ganz einfach gegen neues ausgewechselt.

3.3.3 Kalksandsteine

Die E DIN 106 Teil 1 determiniert die Kalksandsteine als Voll-, Loch-, Hohlblöcke, Plansteine, Planelemente, Fasensteine (KS-Steine mit abgefasten Kanten), Bauplatten und Formsteine, Teil 2 als Vormauersteine und Verblender.

Die Steine werden industriell gefertigt: Gemahlerer Branntkalk wird mit kiesel-säurehaltigen Zuschlägen wie Sand unter geringem Wasserzusatz im Mischungsverhältnis von etwa 1:12 gemischt. Das Gemisch wird in Reaktionsbehältern zwischengelagert. Dort löscht der Kalk unter Zugabe von Wasser zu Kalkhydraten ab.

Abb. 3.12 Kalksandsteinmauerwerk aus großförmigen Blöcken



Nach etwa 4 Stunden wird das Gemisch in einem Nachmischer auf Pressfeuchte gebracht und in automatischen Pressen mit Drücken bis 25 N/mm^2 zu Rohlingen geformt. Die Rohlinge werden anschließend in Druckkesseln, den sog. „Autoklaven“, unter Druck gehärtet (Scholz et al. 1999).

Die Kalksandsteine werden seit etwa 150 Jahren in gleicher Weise wie die Mauerziegel im Mauerwerksbau eingesetzt, besitzen aber den Vorteil der hohen Druckfestigkeit. Nachteilig dagegen ist ihre starke Saugfähigkeit. In der Regel müssen deshalb die Oberflächen der im Freien stehenden, unverputzten Mauern aus KS-Steinen entsprechend behandelt werden. Alte beschädigte Kalksandsteinmauern werden zumeist durch Austausch der schadhaften Partien gegen neues Material repariert (Abb. 3.12).

3.4 Historischer Mauermörtel

3.4.1 Kalkmörtel

Seit alters war der Kalk das Bindemittel für Mauer- oder Putzmörtel schlechthin. Der Kalkstein, Dolomit oder Kalkmergel wurde im Steinbruch gebrochen und in Öfen gebrannt. Nach dem Brennvorgang wurde aus dem Kalkstein bzw. Dolomit der Luftkalk, aus Kalkmergel der hydraulische Kalk. Durch Löschen in einer Erdgrube unter Zugabe von Wasserüberschuss entstand aus dem zumeist durch karbonatische oder organische Bestandteile leicht verschmutzten Branntkalk der Sumpfkalk, beziehungsweise aus dem von 90 % der Verunreinigen zuvor sorgfältig befreiten Stückkalk der Weißkalk und aus dem aus gebranntem Dolomit hergestellten Branntkalk der Schwarzkalk. Alle diese Kalke ergaben als Bindemittel einen sehr weichen Verputz- oder Mauermörtel. In der Grube gelöschter Sumpfkalk wurde

außerdem als Grundstoff fast aller historischen Anstriche eingesetzt. Kalk war ein äußerst billiger Baustoff und wurde deshalb geradezu universal eingesetzt, nämlich für Mauer- und Putzmörtel, aber auch für Farben.

Hydraulische Kalke enthalten Bestandteile, die durch Reaktion mit Wasser zementähnlich erhärten. Das Wasser wird dabei chemisch gebunden, man nennt den Vorgang „*Hydratation*“. Hydraulische Bindemittel sind im Wasser unlöslich, widerstehen dem Wasser und bestehen aus Verbindungen zwischen einer unhydraulischen Base – Kalk – und so genannten „*Hydraufaktoren*“ wie: Kieselsäure, Tonerde und Eisenoxid. Historische „*Hydraufaktoren*“ sind puzzolanische Stoffe, also vulkanische Tuffe wie sie in Puzzuoli bei Neapel vorkommen, und vor allem Trass, Ziegelmehl sowie Kalke mit einem hohen Gehalt an Kalziumaluminaten, wie ihn etwa der Romankalk aufgewiesen hatte. Wegen der Beigabe von hydraulisch wirksamen Ziegelmehl sind historische Mauermörtel oft rötlich eingefärbt. Heute regelt die DIN 1060 und neuerdings die DIN EN 459-1 die Anforderungen an das Bindemittel Kalk.

Luftkalk Bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts wurden neben Gips ausschließlich Luftkalke für die Herstellung von Mauermörteln eingesetzt. Erst dann kamen die industriell hergestellten, mageren, geringfügig auch hydraulisch wirkenden Weißkalke auf. Aus Kalkmergel oder tonigem Kalk wurden hydraulische Kalke gebrannt. Kalkbrenner brannten den Kalkstein; Maurer, Tüncher, Stuckateure und Maler löschten in der Regel den Kalk selbst und unterhielten große Sumpfkalkgruben über viele Jahre lang. Baumeister kalkulierten die benötigte Menge an Kalk in ihren Materialermittlungen für jedes Gebäude individuell.

Als beispielsweise im Jahre 1763 Instandsetzungsarbeiten an der protestantischen Pfarrkirche in Weisendorf/Mfr. auszuführen waren, hieß es in der dazu gehörigen Abrechnung: „*Der Kalkbrenner in Sachsen* [vielleicht Ober- oder Waldsachsen bei Neustadt an der Aisch] lieferte dazu 90 Malter Kalk, die der Schulmeister Johann Nicolaus Leckert mit Hilfe eines Bauern und dessen Fuhrwerks persönlich dort abholte.“ (Kirchenarchiv Weisendorf) Da Malter ein damals gebräuchliches Maß für Schüttgut, z. B. Getreide, war, konnte es sich nur um zu Pulver zermahlenen, getrockneten Sumpfkalk gehandelt haben, denn der Kalk wurde, wie unsere Quelle weiterhin berichtet, unmittelbar zum Mauern und später zum Verputz gebraucht.

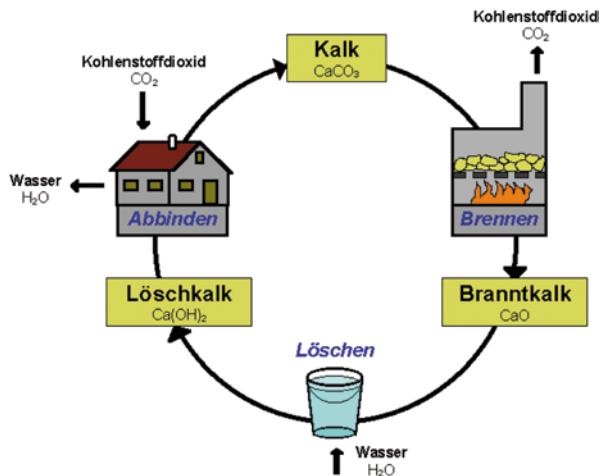
Folgende Luftkalke wurden bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts als Bindemittel für Mauermörtel verarbeitet: Branntkalk bzw. Stückkalk als Vorstufe zum Löschkalk oder Sumpfkalk, Fett- und Magerkalk als Zustände des Löschkalks, Mergelkalk, Weißkalk und Dolomitkalk. Am häufigsten wurde aber für Mörtel der Lösch- oder Sumpfkalk als Bindemittel eingesetzt.

Seit dem 19. Jahrhundert stellte man den Sumpfkalk auch industriell her. Im Unterschied zum in der Grube gelöschten Sumpfkalk blieben dabei alle „*tauben*“, insbesondere wasserbindenden, hydraulischen Bestandteile im Kalkhydrat erhalten und wurden mitverarbeitet. Ihr Anteil ging infolgedessen als eigentliches Bindemittel verloren, der Kalk war damit weniger ergiebig und wurde deshalb „*mager*“ genannt. Diese Erscheinung kannte man auch früher schon beim so genannten „*scharfen Brand*“ des Stückkalks. Magerkalk kann bis zu einem Drittel des Kalkhydrats aus-

Tab. 3.8 Historische Kalke als Bindemittel für Putz- und Mauermörtel sowie Anstriche

Historische Bezeichnung	Chemische Bezeichnung	Merkmale und Verwendung	Heutige Bezeichnung
Ätzkalk, Brannitkalk	Kalziumoxid CaO	Es handelt sich um gebrannten Kalk. Er wird in Lebensmitteln als künstlicher Saureregulator, in der Chemie als Trocknungs- und Neutralisationsmittel eingesetzt	Ätzkalk, Brannitkalk, gebrannter Kalk, ungelöschter Kalk
Löschkalk, Sumpfkalk, Fettkalk	Kalziumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$	In der Kalkgrube richtig gelöschter Sumpfkalk, wird bei längerer Lagerung in der Grube zum Fettkalk	Gelöschter Kalk, Sumpfkalk, Luftkalk, Fettkalk
Löschkalk, Magerkalk	Kalziumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$	Entsteht bei „ <i>scharfem Brand</i> “ oder bei industriellem Brennen, wenn Verunreinigungen, so genannte „taube“ Bestandteile im Kalk verbleiben	Unzureichend gelöschter Kalk, Magerkalk
Kalkmilch	Kalziumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ + viel H_2O	Mit Wasser verdünnter Sumpfkalk, geeignet für Anstriche	Kalkmilch
Kalkwasser	Kalziumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ + klares Wasser H_2O	Je 100 ml H_2O enthalten ungefähr 0,16 g $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Es dient zur Festigung alter Kalkputze und Kalkfarben	Kalkwasser
Marmorkalk	Kalziumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aus kristallinem CaCO_3	Aus weißem Marmormehl hergestellter Sumpfkalk von hoher Reinheit	Marmorkalk
Weißkalk	Kalziumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ + max. 10 % anderer Stoffe	Aus fast reinem Kalkstein CaCO_3 , mit ca. 800 °C gebrannt, trocken gelöst zu Weißkalkhydratpulver oder nass gelöscht zu Weißkalkhydrat, wegen des geringen Anteils anderer Stoffe oft auch magerer Kalk, geringfügig hydraulisch	Weißkalk, Magerkalk; DIN 1060 – CL 90 und DIN EN 459 – CL 90
Dolomitkalk, Schwarzer Kalk	Kalziumkarbonat + Magnesiumkarbonat $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$	Aus dem Mineralgemenge Dolomit gebrannter grauer bis graubrauner Luftkalk. Bei den Stuckateuren nicht beliebt, da sein hoher Magnesiagehalt alle Vorgänge verlangsamt. Er reagiert mit Schwefeldioxid zu bauschädlichen Magnesiumsulfatsalzen!	Nach DIN EN 459-1: Dolomitkalk DL, Graukalk, Schwarzkalk, Magerkalk
Romankalk	Natürlich hydraulisch erhaltender Kalk NHL	Aus tonhaltigem Kalk gebrannt, hellgelb-bräunliche Farbe, geschmeidig und riss-frei. Wird heute nicht mehr hergestellt	Peißenberger-Fassaden-Cement, Roman-Cement
Mergel- oder Wasserkalk	Kalksteinmengel $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ und andere Hydraulikfaktoren	Hydraulische, auch unter Wasser und bei Luftabschluss wirksame Erhärtung. Tonerde, Kieseläsüre, insgesamt mehr als 10 % hydraulisch wirksame Bestandteile	Wässerkalk, hydraulischer Baukalk, nach DIN EN 459-1: Hydraulischer Kalk – HL 3,5 (NHL 3,5)

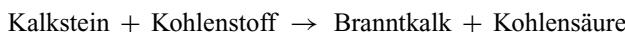
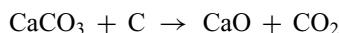
Abb. 3.13 Kalzium-Kreislauf. (Quelle: www.hargarten-online.de, Stand Mai 2006)



machen. Fettkalk dagegen entsteht, wenn der Branntkalk einen hohen CaO-Anteil besitzt, sehr sorgfältig gelöscht und recht lange in der Grube gelagert wird (Tab. 3.8).

Schon die Menschen in prähistorischer Zeit stellten fest, dass sie durch Brennen mit der Hitze diesem Gestein zunächst in der Rotglutphase das Wasser und dann in der Weißglutphase die Kohlensäure austreiben konnten und sie dadurch den begehrten Branntkalk erhielten. Der Branntkalk ist sowohl fast um die Hälfte leichter als der ursprüngliche Kalkstein, aber auch sein Rauminhalt hat sich um 10–15 % verringert. Die prähistorischen Kalkbrenner stellten außerdem sofort fest, dass der abgekühlte Branntkalk mit Wasser sehr heftig reagieren konnte.

Der Brennvorgang selbst fand seit Jahrtausenden in zumeist kreis- oder eiförmigen Kalköfen statt. Der Brennraum wies in der Regel eine Höhe von etwa drei Metern auf und musste selbstverständlich mit hitzebeständigem Material, z. B. Lehm, ausgekleidet sein. Oben befand sich ein schmaler Umgang und eine Öffnung, die zum „Beschicken“ des Ofens, das heißt zum Einfüllen des Kalksteins in den Ofen vor dem Brand, und zum Ausräumen nach dem Brand diente. Von außen führte zu der oberen Öffnung entweder eine Rampe hinauf oder der Brennraum wurde an einem steilen, die Rampe ersetzen Hang errichtet. Ganz oben saß ein konusförmiger Ofen mit einem oder mehreren Schürlöchern und Luftklappen zur Zugregelung. Ein oder mehrere Kalkbrenner schürten den Ofen mit Holzscheiten mehr als vier Tage und Nächte durchgehend ohne Pause, also wenigstens einhundert Stunden lang, denn die Hitze durfte nicht absinken. Für einen Brand von etwa 20 m³ Kalkstein wurden 50 Ster Fichtenscheite benötigt. Erst wenn der Kalkstein weißgelb glühte, was bei etwa 950 Grad begann, wurde auch die Kohlensäure ausgetrieben. In einer chemischen Formel stellt sich dies folgendermaßen dar (Abb. 3.13):



Nach dem Brennen musste der Ofen schnell ausgeräumt werden, damit der Branntkalk, auch Ätzkalk genannt, so wenig Wasser wie möglich aus der Luft aufnehmen konnte, denn dies hätte seine Beschaffenheit verschlechtert. Der gebrannte Kalk wurde in Brocken, also einzelnen Stücken, aus dem Ofen gewonnen, deshalb nannte man ihn auch „*Stückkalk*“. Häufig kam es dabei vor, dass der Stückkalk mit Holzkohle und Asche verunreinigt wurde.

Ende des 19. Jhd. entwickelte man die Ringöfen und später die Zick-Zack-Öfen in denen kontinuierlich Ziegel und Kalk gebrannt wurden. Heute wird hauptsächlich in kontinuierlichen Schachtofen, in Ringöfen, den Drehrohröfen oder den Wopfingeröfen mit Gas gebrannt. Die Effektivität und Gleichmäßigkeit der Kalkqualität ist heute sehr hoch, nicht zuletzt aus dem Grunde, dass nur reinste Kalksteinsorten gebrannt werden.

Zum Kalklöschen hatten sich zwei Verfahren bewährt: das Trocken- und das Nasslöschen. Beim erstenen wird dem Kalk nur diejenige Menge an Wasser zugeführt, die ausreicht, dass er zu einem Pulver zerfällt. Dabei wurde der Branntkalk in faustgroße Stücke zerschlagen, auf einem Sandbett ausgebreitet und mit Wasser übergossen. Dies geschah so lange bis die Kalkstücke den so genannten „*Nässeglanz*“ bekamen. Dann schüttete man die nächste Sandschicht darüber, auf der man das Löschverfahren mit weiterem Stückkalk wiederholte. Am Schluss wurde der auf solche Weise entstandene große Haufen mit Sand abgedeckt. Eine andere gängige Form des Trockenlöschens bestand darin, dass man den Kalk in eiserne Körbe füllte, diese anschließend so lange ins Wasser tauchte, bis keine Blasen mehr aus dem Korb aufstiegen. Danach wurde auch der derart gelöschte Kalk auf ein Sandbett geschüttet und schließlich mit Sand abgedeckt. Der trockengelöschte Kalk konnte erst nach mindestens acht Tagen als Baustoff für Maurer- und einfache Putzarbeiten verwendet werden.

Zum Nasslöschen benötigte man früher zunächst Erdlöcher oder -mulden, die einen Ablauf in eine tiefere Grube besaßen, den „*Sumpf*“. Später vereinfachte man diesen Vorgang, indem der Handwerker den Branntkalk in hölzerne oder eiserne Pfannen von etwa 2 m Breite, 3 m Länge und ca. 0,4 m Tiefe füllte. Die Pfanne füllte man mit Stückkalk und goss die 2,5- bis dreifache Menge an Wasser hinein. Der Kalk fing an im Wasser zu kochen, wobei Temperaturen von über 150 Grad auftraten. Deshalb musste man – wie schon bei Vitruv (Fensterbusch 1976) beschrieben – den Kalkteig kräftig rühren, denn ein Überhitzen führte zum „*Verbrennen*“ des Kalks. Dies geschah insbesondere dann, wenn zu viel Stückkalk in der Pfanne war. War zu wenig Kalk im Wasser, dann „*ersoff*“ er und wurde gleichfalls unbrauchbar. Anschließend wurde der gelöschte Kalk als dickflüssige weiße Kalkmilch durch ein Sieb am Ende der Pfanne in eine Grube, den „*Sumpf*“, gefüllt und abgedeckt.

Der Branntkalk CaO vergrößert durch das „*Löschen*“, also durch Aufnahme von Wasser H_2O , sein Volumen um mehr als das Zweieinhalfache. Es wird Sumpf- oder Löschkalkhydrat $Ca(OH)_2$ aus ihm. Guter Sumpfkalk zeichnet sich dadurch aus, dass aus ein to Stückkalk etwa 2,6–2,8 m³ Feinkalk oder Kalkhydrat entstehen. Ein rentabler Kalksumpf muss also mehr als 3 m³ groß sein. Er muss außerdem

Tab. 3.9 Empfohlene Standzeiten des Sumpfkalks.
(Vierl 1987, S. 187)

Verwendungszweck	Empfohlene Einsumpfdauer
Mauermörtel	Gleich nach dem Ablöschen
Malerarbeiten	Ca. neun Monate nach dem Ablöschen
Putzarbeiten	Ca. achtzehn Monate nach dem Ablöschen
Stuckarbeiten	Ca. drei Jahre nach dem Ablöschen

dicht abgedeckt werden können, sonst würden Erde, Sand oder andere Verschmutzungen in den Kalkteig fallen, was jedoch nicht immer vermieden werden kann. Der verunreinigte Sumpfkalk verliert infolgedessen sehr an Wert.

Beim Nasslöschen muss man aufpassen, dass der Löschtorgang nicht unterbrochen wird, sonst können in der dicken Kalkmilch die noch ungelöschten Teilstückchen nicht absinken. Bei jeder Unterbrechung des Löschtorgangs entsteht eine Schicht eingedickten Kalkes, die nach Fortsetzen des Löschens als Zwischenschicht im Kalkbrei wirkt und die ungelöschten Teilchen festhält. Aus diesem Grund können sie nicht mehr absinken und gelöscht werden. Das Ziel des Löschens ist feines, gleichmäßiges, sämiges Kalkhydrat ohne störende ungelöschte Kalkstückchen. Selbstverständlich muss nach dem ersten Löschen noch ein für den Erhalt des vollen Kalkwertes erforderliches Nachlöschen stattfinden.

Diejenige Zeitspanne, die gebrannter Kalk nach dem Nasslöschen eingesumpft bleiben muss, bevor er mit Sand zu sofort bearbeitbarem Mörtel angemacht werden darf, nennt man „*Einsumpfdauer*“. Über sie kann man auch unter erfahrenen Bauhandwerkern weit auseinander klaffende Meinungen hören. Sie schwanken zwischen vier Wochen und 30 Jahren! Als sinnvoll gelten jedoch die in der Baupraxis bewährten Standzeiten des Sumpfkalks, wie in unserer Tab. 3.9 angegeben.

Eingesumpfter, gelöschter Kalk braucht in jedem Falle eine Nachbehandlung. Deshalb muss er wöchentlich beobachtet werden. Auf der Kalkoberfläche bildet sich nämlich eine dünne Wasserschicht, die erst im Laufe von etwa sechs Wochen aufgesogen wird. Verschwindet die Wasserschicht schneller, muss Wasser in die Grube gefüllt werden, sonst verbrennt der Kalk. Nach ungefähr zwei Monaten werden sich mehr als fingerbreite Risse an der Kalkoberfläche bilden. Auch in diesem Fall muss Wasser nachgefüllt werden, bis alle Risse gefüllt und außerdem noch eine etwa drei cm hohe Wasserschicht den Kalk abdeckt. Nimmt der Wasserstand in den nächsten Wochen infolge von Verdunstung nur unmerklich ab, ist der Kalk gelöscht und für Mauerarbeiten brauchbar (s. Tab. 3.9). Der Kalk muss auch weiterhin stets feucht gehalten werden. Gegen Frost wird er am besten mit einer Auflage aus Stroh geschützt.

- Solange der Kalk in der Grube nicht mit Luft in Berührung kommt, bleibt er jahrelang unverändert brauchbar.

Weißkalk Um Weißkalk herzustellen, wird der Kalk im industriellen Verfahren gebrannt. Dabei bleiben zum geringen Teil „taube“, beziehungsweise nach dem Brand wasserbindende, hydraulische Stoffe erhalten und werden mitverarbeitet. Weil solche Verunreinigungen nicht auszuschalten sind, erlaubt heute die Norm

DIN 1060 bzw. DIN EN 549 – CL 90 (CL = *calcium lime*) bis zu 10 % Gehalt an Magnesia, Silikaten und Tonerde. Diese Stoffe werden – wie gesagt – durch den Brand hydraulisch, also wasserbindend, und benötigen zum Abbinden nicht nur CO_2 aus der Luft sondern auch Wasser. Dabei wird das Wasser chemisch gebunden, ein Vorgang, den man „*Hydratation*“ nennt. Je geringer die hydraulischen Anteile sind, desto ergiebiger ist das Weißkalkhydrat. Es zerfällt nach dem Trocknen von selbst zu Pulver.

Romankalk Romankalk ist ein natürlich hydraulisch erhärtender Kalk. Da in der Natur eher selten reine Kalke vorkommen, brannten die Kalkbrenner ohne lange Umstände denjenigen Kalkstein, den sie gerade vorfanden. Wie schon öfter gesagt, entwickeln sehr viele tonige und mergelige Verunreinigungen im Kalkgestein nach dem Brennen eine hydraulische Wirkung im Kalkhydrat. Amorphe Silikate in sehr feinen Korngrößen reagieren mit dem Kalk, es entstehen Kalziumsilikate mit ihren typischen Kristallnadelstrukturen unter Einbindung von Wasser. Deshalb härten diese Kalke auch unter Luftabschluss. Je nach dem Verhältnis zwischen Kalk und Mergel und der Aufteilung der tonigen Einschlüsse in silikatische und aluminatische Phasen reagieren diese Kalke anders. Selbstverständlich brachte die Erfahrung und nicht die chemische Analyse die Maurer dazu, hydraulische Kalke einzusetzen, z. B. im Fundamentbereich oder beim Außenputz. Wenn ein natürlicher hydraulischer Kalk in einer Kalkgrube gelöscht wird, erhärtet dessen gesamter Inhalt keineswegs gleichmäßig. Die hydraulischen Bestandteile bilden nämlich Klumpen und der Kalk ist mit hartem Gries verunreinigt. Diese Klumpen reagieren später nicht mehr, ihre hydraulische Wirkung ging verloren.

Dementsprechend musste man bei diesen Kalken das Nasslöschverfahren vermeiden und stattdessen Trockenlöschverfahren einsetzen, denn trockengelöscht entfalteten sie erst ihre vollen Aushärtungseigenschaften. Natürliche hochhydraulische Kalke kennt man erst seit der Erfindung des Romanzementes, bei dem ein experimentell gemeinsam gebranntes und aufgemahlenes Mineralgemenge aus Kalk und Ton ein sehr schnell und sehr hart abbindendes Material ergeben hat. Infolgedessen entstand eine Industrie für solche hochhydraulischen Kalke. Ihren Höhepunkt erreichte sie um 1900 beispielsweise in Bayern mit dem so genannten „*Peißenberger-Fassaden-Cement*“. Die Architektur dieser Zeit zeigt ihre prächtigen, wetterfesten Fassaden, deren Oberflächen heute jedoch große Schwierigkeiten in der Restaurierung bereiten.

Chemisch gesehen besteht ein natürlich hydraulisch erhärtender Kalk hauptsächlich aus Kalkhydrat und Dikalziumsilikat. Die anderen Zementphasen entstehen wegen der niederen Brenntemperatur und der nicht vorhandenen Metallphasen erst gar nicht. Diesem Umstand ist zu verdanken, dass Mörtel mit diesem Bindemittel zwar eine hohe Frühfestigkeit erreicht, aber im E-Modul sich kaum anders verhält als durchkarbonatisierte Kalkmörtel.

Mergel- oder Wasserkalk Ein Mörtel mit dem Bindemittel Mergel- oder Wasserkalk weist bereits eine geringe wasserbindende, also hydraulische Erhärtung auf. Dieses Bindemittel wird aus Kalkmergel (75 % Kalk und 25 % Ton) gewonnen

und enthält daher erhebliche Beimengungen, nämlich mehr als 10 %, aus Tonerde Al_2O_3 und Kieselsäure SiO_2 . Mergelkalksteine riechen beim Anhauchen nach Ton. Der angemischte Mörtel verfestigt sich zunächst durch die kalktypische karbonatische und darüber hinaus noch durch eine hydraulische Erhärtung. Dadurch kann der Mörtel auch unter Wasser und bei Luftabschluss erhärten.

3.4.2 Zuschlagstoffe

Zuschlagstoffe sind gemeinhin ein Gemenge an Körnern, in Sonderfällen auch an Fasern, oder organischen Stoffen wie Eiweiß, Blut oder Milch. Mit Kalk und Wasser vermischt wurden sie zur Herstellung von Putz- oder Mauermörteln verwendet.

Zuschläge für historische Mauermörtel bestehen vorwiegend aus ungebrochenen oder zerkleinerten Natursteinen in Form von Kies und Sand. Daneben kommen auch künstlich hergestellte, vorwiegend mineralische Stoffe wie Schlacken vor.

Zusätzlich wurden dem Mörtel – wie bereits erwähnt – auch hydraulische Zuschläge beigemischt. Es handelte sich dabei um gemahlene Backsteine, Puzzolane, Trassmehl und manchmal auch gemahlene Holzasche.

Sand Es handelt sich bei den Sanden um sedimentäre Lockergesteine, die durch den weiten Wassertransport in Bächen und Flüssen meist abgeschliffen wurden, während sie am Flussoberlauf noch kantig und bruchrau erhalten blieben. Sande sind zumeist stark quarzhaltig. Künstliche Zuschläge spielen beim historischen Mauermörtel nur eine unbedeutende Rolle.

Sand kommt als Gruben- und als Flusssand vor. Während der Flusssand meist frei von schädlichen Bestandteilen ist und zudem sehr scharfe Körner aufweist, finden sich im Grubensand humose, z. B. pflanzliche Teile, abschlämmbare Bestandteile wie Lehm- oder Tonablagerungen und schließlich lösliche Salze, Eisenverbindungen und Säuren. Grubensand musste immer vor dem Verwenden für Mauermörtel erst einmal gewaschen oder durch Werfen durch geeignete Siebe gereinigt werden.

Sande im historischen Mauermörtel zeigen zumeist humose Beimengungen in größerem Umfang. Außerdem können sie oftmals eisenhaltig sein. Die Reinheit des Sandes galt auch vor Zeiten schon als gewährleistet, wenn verhältnismäßig wenige Masse-% an abschlämmbaren Bestandteilen toniger oder lehmiger Natur vorhanden waren. Die alten Baumeister kannten schon vor Jahrhunderten den Wert guten Sandes im Verputz- und Mauermörtel. Heute noch sind z. B. die Sandgruben für die mittelalterliche Stadtmauer der Reichsstadt Nürnberg bekannt. Die Bedeutung der Reinheit des Sandes für den Mörtel bei historischen Bauten ist auch durch unser eingangs erzähltes Beispiel aus Oberdachstetten belegt (s. Abb. 1.1).

Die Kornzusammensetzung sollte gemischtkörnig sein. Dies beherzigten z. B. die Römer beim Herstellen ihres Mauermörtels. Dies haben wir bereits am Aquädukt in Barbegal sehr gut beobachten können (s. Abb. 2.13).

Selbstverständlich wurde Mörtel aus Bindemitteln, Zuschlagstoffen und Wasser angemacht. Auch das Anmachwasser enthielt früher oft starke Verunreinigungen oder entsprechend aggressive Chemikalien, da es aus den nahe gelegenen Flüssen, Bächen oder Teichen geschöpft wurde, die bis ins 20. Jahrhundert hinein als Vorfluter für fäkalienreiches Abwasser dienten. Solche Bestandteile des ursprünglichen, originalen Mörtels verursachten Schädigungen des Mauerwerks, die bei einer Instandsetzungsmaßnahme häufig angetroffen werden, ohne ihre historisch bedingten Ursachen dabei zu erkennen.

Hydraulisch wirkende Zuschläge Ausgesprochen hydraulisch wirkende Zusätze sind bereits von den Bauwerken der Römer bekannt. Sie mischten beim Bau von Hafenanlagen, Gewölben und Aquädukten in großen Mengen Puzzolanerde, Ziegelmehl und vulkanische Tuffe dem Mauermörtel zu. Sie wussten: Wenn diese hydraulischen Zuschläge bis zur richtigen Korngröße zerkleinert oder gemahlen dem Mörtel beigegeben werden, reagieren sie mit dem Kalk wasserbindend und statten den Mauermörtel mit einer deutlich verbesserten Wasserresistenz aus. Wenn aus heutiger Sicht historische, zum Beispiel von Vitruv mitgeteilte Mörtelrezepturen nachgestellt werden sollen, muss freilich immer berücksichtigt werden, dass mit der Hand ausgegrabene und ungereinigt zugemischte Vulkanerde eben nicht allein aus reaktivem Material besteht, sondern hauptsächlich aus solchen Korngrößen, die nicht als einfacher Zuschlag reagieren. Da die moderne Industrie aber heute möglichst reine und fein gemahlene, praktisch nur aus reaktivem Material bestehende Trasse anbietet, existiert die Gefahr der Überdosierung. Darauf muss immer wieder hingewiesen werden. Die daraus entstehenden Schäden werden jedoch fälschlich dem Kalk zugeschrieben und damit wird eine ursprünglich sehr gute Technik verunglimpft (Tab. 3.10).

Ziegelmehl Mit niedrigen Temperaturen gebrannte Tone, zum Beispiel mit unter 800 °C gebrannte Ziegel, wirken ebenfalls in gemahlenem Zustand leicht hydraulisch. Ziegelmehl wurde von den Römern dem Kalkmörtel der Aquädukte und Gewölbe zugeschlagen, um sie durch die hydraulische Wirkung belastbarer zu machen. Auch die Rinnen der Wasserleitungen oben auf den Aquädukten wurden mit wasserbeständigem Mörtel mit Zuschlägen aus Ziegelmehl ausgekleidet, um sie entsprechend wasserdicht zu halten (s. oben Aquaedukt in Barbegal Abb. 2.13). Die hochgebrannten, industriell hergestellten Ziegel haben jedoch ihre hydraulische Wirkung verloren.

Puzzolanerde Vitruv schreibt im 6. Kapitel seines zweiten Buches über Architektur: „*Es gibt aber auch eine Erdart, die von Natur wunderbare Ergebnisse hervorbringt. Sie steht an im Gebiet von Bajae und der Städte, die rund um den Vesuv liegen. Mit Kalk und Bruchstein gemischt gibt sie nicht nur den übrigen Bauwerken Festigkeit, sondern auch Dämme werden, wenn sie damit im Meere gebaut werden, im Wasser fest*“ (Fensterbusch 1976). Es handelte sich um Puzzolanerde. Der Name stammt vom italienischen Ort Puteoli (heute Pozzuoli) im Gebiet des antiken Bajae am Fuße des Vesuv, wo bereits im Altertum große Mengen an puzzolanischer

Tab. 3.10 Historische Zuschlagstoffe

Historischer Zuschlagstoff	Chemische Bestandteile	Behandlung bzw. Wirkungsweise	Heutiger Zuschlagstoff
Sand	Fluss- und Grubensand aus Kieselstein-gemisch, sedimentäre Lockergesteine	Gewaschen oder gesiebt, um von Verunreinigungen frei zu werden. Korngröße: Feinsand weniger als 1/3, Größtkorn etwa 1/3 der Putzlagendicke	Gewaschener Fluss- oder Grubensand
Ziegelmehl	$\text{Ca(OH)}_2 + \text{Ziegelmehl}$	Kalk bindet mit Ziegelmehl aus niedrig gebrannten Ziegeln hydraulisch ab	Lässt sich mit industriell gefertigten, hochgebrannten Ziegeln nicht mehr herstellen
Puzzolane	Puzzolanerde mit einem hohen Anteil an amorphen Silikaten	Gehört zu den vulkanischen Tuffen und bindet mit Kalk hydraulisch ab	Wird heute zur Herstellung von Zement und Beton verwendet
Holzasche	Gebrannte Holzkohle, Buchenholzasche enthält etwa 18 % Pottasche	Der hohe Pottascheanteil (Kaliumkarbonat K_2CO_3) wirkt ebenfalls leicht hydraulisch	wird heute nicht mehr verwendet
Trass	Vulkanischer Tuff, gehört zur Stoffgruppe der Puzzolane	Kalkhydrat bindet unter Zugabe von Trass im Verhältnis 1:1 hydraulisch ab und ist auch für Mörtel unter Wasser geeignet	Rheinischer und bayerischer Trass, DIN 51 043 (08.79) Hydraulischer Kalk HL 5 nach DIN EN 459-1

Vulkanasche gewonnen und für römischen Beton „*opus caementitium*“ verarbeitet wurden.

Die Puzzolanerde weist wie alle vulkanischen Tuffe große Anteile von amorphen Silikaten in verschiedensten Formen auf. Vulkanische Tuffe sind zum Beispiel die unterschiedlichen Trass-Arten in Bayern und am Rhein. Zusammen mit Kalkhydrat und Wasser reagieren Puzzolane latent hydraulisch und bilden Kalziumsilicat- und Kalziumaluminathydrate. Dies sind die gleichen Kristalle, die auch bei der Erhärzung = „*Hydratation*“ von Zement entstehen und die z. B. die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Beton bewirken.

Puzzolane werden deshalb auch heute noch häufig als so genannte Zusatzstoffe für die Herstellung von Zement oder Beton verwendet. Künstliche Puzzolane sind z. B. Flugaschen aus mit Steinkohle befeuerten Kraftwerken.

Trass Trass ist ein natürlicher Rohstoff. Er gehört zur Stoffgruppe der Puzzolane und findet aufgrund seiner Mörtel verbesserten Eigenschaften, wie Steigerung der Resistenz von Bindemitteln gegenüber chemischem Angriff und einer geringen Wasserdurchlässigkeit, schon seit über 2000 Jahren Verwendung in Mörteln.

Trass ist ein ökonomischer und technologisch wertvoller Baustoff, da er einen Teil des Bindemittels in Mörteln und Teile des Zementes in Betonen ersetzen kann. Als Trass bezeichnet man im deutschsprachigen Raum verschiedene Gesteine. Trass ist kein petrographischer Begriff, der ein mineralogisch und genetisch einheitliches

Gestein beschreibt. Vielmehr ist er ein technologischer Begriff, der unterschiedliche Gesteine mit puzzolanischen Eigenschaften zusammenfasst. Die Bezeichnung Trass stammt vom niederländischen Begriff „*Tyrass*“, was soviel heißt wie Kitt oder Kleber.

Nach DIN 51 043 – *Trass; Anforderungen, Prüfung* – ist Trass ein natürlicher, saurer, puzzolanischer, aufbereiteter Tuffstein. Petrologisch gesehen wird er hauptsächlich aus glasigen und kristallinen Phasen aufgebaut sowie einem geringen Teil an Xenolithen. Chemisch besteht das Gestein überwiegend aus Siliziumdioxid (Kieselsäure SiO_2) und Aluminiumoxid (Tonerde Al_2O_3) sowie aus geringen Anteilen von Erdalkalien, Eisenoxid und Alkalien.

Im Mittelalter ging das römische Wissen um die Nutzung von Trass in Mörteln verloren. Nur in Klöstern blieben die antiken Überlieferungen, etwa in den zehn Büchern Vitruvs, erhalten. Bis Mitte des 18. Jahrhunderts wurden in den meisten Ländern Europas lediglich gebrannter Kalk und Gips als Bindemittel eingesetzt. In Mitteleuropa wurde jedoch mit Beginn der Neuzeit auch Rheinischer Trass als puzzolanische Komponente regional genutzt. Er wurde ab dem 16. Jahrhundert vor allem von Holländern hauptsächlich in großen Tagebauen und teilweise in Stollen-systemen im Brohltal und untergeordnet auch im Nettetal abgebaut und über den Rhein in die Niederlande verschifft. Die Holländer verwendeten das Bindemittel-gemisch aus Brannkalk und Trassbeimengungen vor allem zur Herstellung von „*Unterwasserbeton*“. Dieser wurde wegen seiner geringen Wasserdurchlässigkeit und der damit verbundenen Meerwasserunempfindlichkeit vor allem in Kanalbauten, Hafen- und Deichanlagen verbaut.

Ab Mitte des 18. Jahrhunderts wurden neue hydraulische Zusätze für hydraulischen Kalkmörtel entwickelt. Von besonderem Interesse in der Forschung waren vulkanische Ablagerungen, wie die genannten Schlacken und Tuffe aus dem Laacher-See-Gebiet, bzw. vermahlene Dachschiefer. Der Übergang vom Kalk-Puzzolan-Mörtel zum Zement vollzog sich in Westeuropa etwa ab 1820. Mit dem Aufkommen der Betonbauweise im Industriezeitalter und der großmaßstäblichen Nutzung von Rheinischem Trass als hydraulischem Faktor in den Mörteln, entstand im Neuwieder Becken ein florierender wirtschaftlicher Zweig. Besonders unter ökologischen und sanierungstechnischen Gesichtspunkten erfreuen sich inzwischen trasshaltige Bindemittel einer stetig wachsenden Bedeutung.

In Deutschland werden zwei unterschiedliche Trasse in Mörteln verwendet, die sich grundlegend in Herkunft und Zusammensetzung unterscheiden:

Der *Rheinische Trass* ist ein vulkanischer Tuff und stammt aus dem Laacher-See-Vulkangebiet.

Der *Bayerische Trass*, der auch als *Suevit* bezeichnet wird, ist dagegen durch einen Meteoriteinschlag entstanden und stammt aus dem Nördlinger Ries.

Puzzolanität beschreibt die Eigenschaft eines Stoffes, beim Anmachen mit Kalziumhydrat $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in wässriger Lösung festigkeitsbildende C-S-H- und C-S-A-Phasen zu erzeugen. Entscheidend dabei ist das Vorhandensein von reaktionsfähiger Kieselsäure und dem Reaktionspartner Kalziumhydrat $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Der Begriff der puzzolanischen Reaktivität beinhaltet zwei Parameter: zunächst die maximale Bindung von Kalk und dann die Geschwindigkeit, in der die Kalkbindung abläuft.

Beide Faktoren hängen von der Beschaffenheit der aktiven Phase und von ihrem Anteil im Puzzolan ab. Alle Puzzolane haben einen hohen Verbrauch an Kalkhydrat $\text{Ca}(\text{OH})_2$, um hydraulisch erhärten zu können. Durch ihren geringen Eigenanteil an CaO reagieren sie langsamer als Klinker oder Hüttensand und brauchen folglich auch länger zum Erhärten. Puzzolanhaltige Bindemittel im Kalkmörtel erfordern daher eine deutlich längere, feuchte Nachbehandlung des Mauerwerks.

Allein mit Wasser reagiert Trass nicht. Zusammen mit Kalkhydrat bindet er jedoch langsam hydraulisch ab, es handelt sich also um einen latent hydraulischen Zuschlagstoff. Trasshaltige Mörtel mindern die Ausblühgefahr, da sie zum einen Kalk unlöslich binden, zum anderen durch vermehrte Gelbildung die Wasserwanderung im Mörtel deutlich behindern.

Vorteilhafte Eigenschaften der Trassmörtel

- widerstandsfähiger als Kalk- und Zementputze
- keine Kalkausblühungen infolge Bindens des *freien Kalkes*
- eignen sich für die Sanierung von feuchtem und salzgeschädigtem Mauerwerk
- bessere Verarbeitbarkeit infolge plastifizierender Wirkung
- erhöhte Festigkeit durch Bildung von Zementphasen
- erhöhte Dichtigkeit durch Porenverschluss
- geringe Neigung zu Rissen wegen hoher Elastizität

Holzasche Verbranntes Holz wirkt durch den hohen Pottascheanteil (Kaliumkarbonat K_2CO_3) ebenfalls leicht hydraulisch. Buchenholzasche enthält etwa 18 % Pottasche. Leitet man in eine konzentrierte Kaliumkarbonatlösung Kohlenstoffdioxid, fällt Kaliumhydrogenkarbonat (KHCO_3) aus, das in Wasser nur schwer löslich ist. Diese hydraulische Wirkung des verbrannten Holzes war auch den barocken Baumeistern bekannt. Deshalb findet man beispielsweise in barocken Mauermörteln häufig Holzasche bzw. -kohlebestandteile.

Fein gemahlene Holzkohle ist außerdem eine wichtige Zutat im Putzmörtel gewesen, weil es an solchen Stellen am Außenputz, an denen Moose und Grünalgen gedeihen, z. B. an Nordseiten von Gebäuden, im Traufschatten von Bäumen, an Stellen, wo Wasser aufsprüht, den mikrobiellen Bewuchs verhindert.

3.4.3 Der Baustoff Gips

Aus Gipsstein $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Doppelhydrat) gebrannter Gips spielt als historisches Bindemittel eine nicht zu unterschätzende Rolle beim Mauerwerksbau.

Brechen und Brennen von Gips Je nach Mächtigkeit des Gipssteins im Steinbruch wurde Gipsstein von Hand gebrochen oder unter Zuhilfenahme von Schwarzpulver gesprengt (Lucas). Soweit die gewonnenen Gipssteine nicht für Mauerwerk

Abb. 3.14 Flurgleicher Gipsbrennofen. (Skizze nach (Lucas))

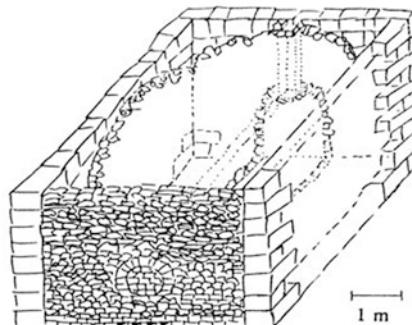
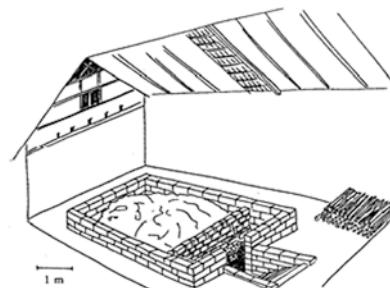


Abb. 3.15 Unterfluriger Gipsbrennofen in der Gips-hütte. (Skizze nach (Lucas))



gebraucht wurden, verbrachte der Gipsbrenner sie in eine Gipshütte. In der Gipshütte gab es verschiedene Gipsbrennöfen, zum einen flurgleiche, aber auch unterflurige. In den meisten Fällen besaß die Ofenkammer einen rechteckigen Grundriss von etwa 4,0 m Breite und 5,0 m Tiefe. Die Wände waren aus Sandstein errichtet und hatten eine Dicke von 60 cm. Dort hinein wurde sehr sorgfältig Gipsstein geschlichtet. Über eine Feuertür konnte man den Brennofen mit Feuerholz beschicken. Auf der Vorderseite befanden sich kleine Zuglöcher, auf der Rückwand ließ man einen Abzugsschacht frei (Abb. 3.14, 3.15).

Die Ofenkammer war oben offen, der Rauch zog über eine Dachgaube des Brennhauses ab. Als Brennholz diente zumeist Fichtenholz. Für eine Brenncharge benötigte man zwei Klafter (= 6 m³) längs gespaltene, etwa meterlange Holzscheite. Ein Brand dauerte ungefähr fünf Tage. Da die Steine fast gar keine Glut zeigten, musste der die Decke des Brennguts sorgfältig beobachtende Brenner ein paar Steine auf den Hüttenflur hinunter werfen. Die Probesteine wurden mit einem Hammer zerschlagen. Wenn sie sich gut zerschlagen ließen, konnte der Brand beendet werden. Die Abkühlphase dauerte ungefähr vier Tage. Schließlich wurde der gebrannte Gipsstein zur Gipsmühle verbracht. Dort wurde der Gipsstein zunächst mit einem Schlägel zerkleinert und dann in einen Kollergang gefüllt, wo er zu Gipspulver zermauert wurde. Schließlich wurde er in Säcke abgepackt.

Der hier geschilderte Brennvorgang sorgte dafür, dass der Gipsstein zumeist mit höheren Temperaturen als 190 °C gebrannt wurde und dadurch Anhydrit bzw. Estrichgips entstand, der für Mauer- und Verputzmörtel gut geeignet war.

Heute wird der Gips in genau geregelten Kocher- und Drehrohröfen bei einer Brenntemperatur von 120–190 °C hergestellt. Anders als beim Kalk wird durch das Brennen nur das im Kristall vorhandene Wasser etwa zu Dreivierteln ausgetrieben, es erfolgt also keine chemische Umwandlung. Der durch den Brennvorgang entwässerte, dehydrierte Gipsstein wird fein gemahlen und in Säcke verpackt. Dass Gips feuchtegeschützt gelagert werden muss und nicht auf dem Boden liegen darf, versteht sich wegen seines dehydrierten Zustands von selbst.

Die Qualität des Gipses hängt aber nicht allein vom verwendeten Gipsstein, vom sorgfältigen Brand, von einer trockenen Lagerung, sondern auch vom Alter ab. Keine Verpackung ist so dicht, dass sie nicht doch mit der Zeit Feuchtigkeit durchläßt. Alter Gips sieht, auch wenn er trocken geblieben ist, pulvrig und weiß aus und scheint ganz normal verwendbar. Dies kann aber täuschen: Alter Gips kann schlagartig fest werden und am Werkzeug festbacken. Er ist nicht mehr brauchbar, weil er nicht mehr richtig abbindet.

Der Vorgang des Abbindens des Gipses, also das Hartwerden, erfolgt dadurch, dass das durch den Brand entzogene Kristallwasser durch das Anmachwasser ersetzt wird und der Gipsbrei erneut kristallisiert. Dieser Vorgang wird gestört, wenn das Gipspulver z. B. bereits geringe Mengen Feuchtigkeit aus der Luft gezogen hat. Dann ist der Gips nicht mehr in der Lage, das volle Kristallgefüge aufzubauen, d. h. der Gips bleibt weich.

3.4.4 Gipse im Mauerwerk

Zum Mauern wurden die Gipse früher mit Kalk vermischt. Wegen der Wasserlöslichkeit aller Gipse musste Gipsmauerwerk stets baukonstruktiv oder durch besondere Schutzmaßnahmen vor eindringender Feuchte geschützt werden. Deshalb wurde insbesondere die Füllung zwischen zwei mit Kalkmörtel gemauerten Mauerschalen mit Gipsmörtel und Steinbrocken verfüllt. Bei sehr alten Mauern kann andererseits das Bindemittel Kalk in der Füllmasse in Gips umgewandelt worden sein.

Gips darf niemals mit Zement vermischt werden, auch eine Verwendung beider Bindemittel unmittelbar nebeneinander führt zur Bildung des gefürchteten Zementbazillus oder Ettringits (vgl. Kap. 7). Bei der Instandsetzung von Mauerwerk muss also in jedem Fall sicher gestellt sein, dass die eingebrachten Zemente, z. B. als Suspensionen, nicht auf gipshaltige Bindemittel treffen.

Die Wasseraufnahme bei Baustoffen findet grundsätzlich nur über die Poren des mineralischen Baustoffs statt (Weber 1997). Die Porosität insbesondere der Wandbaustoffe beeinflusst in erheblichen Ausmaßen die Frostbeständigkeit, die Wärmeleitfähigkeit und die Kapillarität. Deshalb stellt die Porosität den Schlüssel zum Verständnis der Problematik dar. Mit der Wasseraufnahme werden Schadstoffe, aber auch z. B. Injektionsmittel aufgenommen (Abb. 4.1).

4.1 Poren in mineralischen Baustoffen

Mauerwerksschäden gehen fast immer mit dem Eindringen von Wasser in das mineralische Gefüge einher. Die Feuchte löst bauschädliche Vorgänge und Wirkungsmechanismen im Porenraum aus. Diese Vorgänge sind deshalb so gefährlich, weil die Mechanismen der Wasseraufnahme schlechend vonstatten gehen und zunächst mit bloßem Auge nicht erkannt werden können. Gleichwohl hängt die Dauerhaftigkeit eines Mauerwerks eng mit der Porosität seiner Baustoffe zusammen. Dabei ist sowohl die Porengröße, der sog. „Porenradius“, und die Porengeometrie als auch die Porengrößenverteilung und das Porenvolumen im Baustoff von entscheidender Wichtigkeit für Art und Umfang der Wasseraufnahme und -abgabe (Weber 1997).

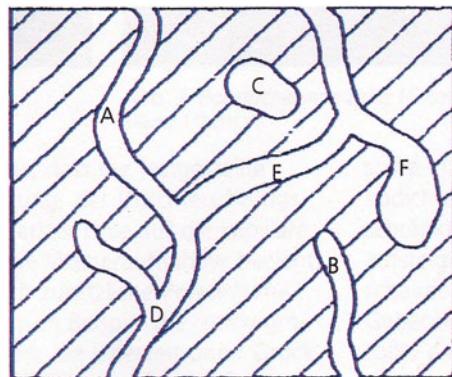
Porenarten Man unterscheidet grundsätzlich zwei verschiedene Porenarten: die in den Ausgangsstoffen befindlichen Eigenporen, die zumeist als natürliche Poren vorhanden sind, z. B. Poren in Natursteinen oder Lehm, und die Haufwerksporen, die bei der Verbindung der Ausgangsstoffe entstehen, z. B. bei der Herstellung von Mörtel oder Beton bei unzureichender Verdichtung (Balak und Pech 2008). Dagegen werden künstliche Eigenporen durch besondere Behandlung des Baustoffs erzeugt, z. B. durch Treibgas, durch Erwärmen mittels Dampf oder durch abruptes Abkühlen kalten Materials, um so Luftporen zu erzielen.

Porengeometrie Poren unterscheidet man nach ihrer geometrischen Gestalt. Man spricht deshalb von durchgehenden Poren, von Sackporen, geschlossenen Poren,

Abb. 4.1 Gaststätte zur Schwane. Deutlich erkennt man die durch Regen und Oberflächenwasser in das Fassadenmauerwerk einge-drungene Feuchte



Abb. 4.2 Schematische Darstellung unterschiedlicher Porenarten. *A* durchgehende Pore, *B* Sackpore, *C* geschlossene Pore, *D* Verzweigung, *E* Verbindung, *F* Flaschenhals. (Skizze nach Weber 1997 und Balak und Pech 2008)



Porenverzweigung, Porenverbindung und schließlich von einer flaschenhalsförmigen Pore (Abb. 4.2).

Die Porengeometrie ist entscheidend für die kapillare Wasseraufnahme. Beispielsweise können Sackporen kaum mit Wasser oder Imprägniermittel gefüllt werden, da sich in den Poren ein das weitere Eindringen behindernder Gegendruck aufbaut. Oder betrachten wir die geschlossenen Poren, die flüssiges Wasser nicht aufnehmen können, sondern nur Wasserdampf. Am besten mit Wasser zu füllen sind Baustoffe mit durchgängiger Porengeometrie, also poröse Baustoffe. Solche durchgängige Poren, die Kapillaren, sind dann am effektivsten, wenn ihre sehr geringen Durchmesser den Feuchtentransport durch Adhäsionskräfte zwischen Flüssigkeit und Kapillarwand bewerkstelligen (Balak und Pech 2008).

Porengröße Die Einteilung der Porengröße erfolgt in drei Gruppen (Tab. 4.1).

Aus der Größenverteilung lässt sich das Wasseraufnahmeverhalten der Baustoffe ableiten und das Porenvolumen bestimmen. (Weber 1997)

Tab. 4.1 Porengröße

Gruppe 1	Mikroporen	$10^{-9}\text{--}10^{-7}$ m	Keine kapillare Leitfähigkeit
	Gelporen	$10^{-9}\text{--}10^{-8}$ m	Keine kapillare Leitfähigkeit
Gruppe 2	Makroporen	$10^{-6}\text{--}10^{-3}$ m	Kapillare Leitfähigkeit
	Kapillarporen	$10^{-8}\text{--}10^{-4}$ m	Kapillare Leitfähigkeit
Gruppe 3	Luftporen	$10^{-5}\text{--}10^{-3}$ m	Kapillarbrechend

Porenvolumen Der Anteil der Poren am Gesamtvolumen des Baustoffs wird Porenvolumen genannt. Wenn ein Baumaterial 18 % Porenvolumen hat, kann es maximal 180 l Wasser oder Imprägniermittel pro m³ Baustoff aufnehmen. In der Bauphysik werden die Größen Porenvolumen und scheinbares Porenvolumen auch durch die Begriffe Wasserkapazität und Sättigungsfeuchte beschrieben:

Wasserkapazität Φ_k (m³/m³) entspricht dem bei kapillarer Wasseraufnahme in der durchfeuchteten Zone sich einstellenden Feuchtigkeitsgehalt.

Sättigungsfeuchte Φ_s (m³/m³) stellt sich immer dann ein, wenn alle Poren und Kapillaren gefüllt sind.

Φ_s ist auf jeden Fall immer größer als Φ_k .

4.2 Wege des Wassers in das Mauerwerk hinein

Zunächst gilt es, die wichtigsten Transportmechanismen für die Feuchtigkeit in das Mauerwerk hinein darzustellen (Weber 1988). Wasser kann sowohl in flüssiger Form als auch in seiner Gasphase als Dampf in das Mauerwerksgefüge eindringen. Außerdem ist die wandinhärente Feuchtigkeit, die Baufeuchte, zu beachten (Balak und Pech 2008, Tab. 4.2).

4.2.1 Wasserandrang in flüssiger Form

Regen, Spritzwasser und Sickerwasser Regen bzw. Schlagregen verfrachtet oft große Mengen Wassers auf die Wandoberfläche, er vermag mit Hilfe des Windes erhebliche Mengen an Wasser auf Fassaden zu bringen. Dabei können Werte bis zu 8 l pro m² in der Minute erreicht werden. Bei Schlagregen bildet sich rasch ein durchgehender Wasserfilm auf den Außenwänden. Das somit flächendeckend herabfließende Wasser dringt nun, unterstützt vom Winddruck, in die kleinsten Risse und Spalten der Maueroberfläche ein. Auf diese Weise gelangt wesentlich mehr Wasser in eine Wand als etwa durch kapillare Aufnahme oder Kondensation.

Oberflächenwasser bildet Pfützen auf den gebäudeangrenzenden Flächen und durchnässt infolgedessen das anstehende Mauerwerk. Ebensoviel Wasser wie auf die Wand bringt der Regen auf die Dächer. Schadhafte Deckung und überlaufende Abflussrinnen sind deshalb eine der häufigsten Ursachen für eindringendes Wasser

Tab. 4.2 Wege des Wassers in das Mauerwerk hinein

Als flüssiges Wasser	Als Wasserdampf	Als inhärente Feuchte
Regen und Spritzwasser	Kondensation	Baufeuchtigkeit
Sicker- und Grundwasser	Kapillarkondensation	Erdfeuchte
Kapillarität	Hygroskopizität	
Anthropogene Ursachen	Adsorption und Absorption	
Infiltration von oben	Einpressung feuchter Luft durch Wind	

Abb. 4.3 Der Sockel eines Kirchengebäudes wurde von einer Rabatte aus großen Kieseln gegen Spritzwasser geschützt

in das Mauerwerk im Traufbereich. Dabei genügen oft kleine Undichtigkeiten wie einige fehlende Dachziegel in der Dachdeckung, um große Schäden zu verursachen.

Ein besonders empfindlicher Bereich ist auch der Sockel eines jeden Gebäudes, also der Bereich, wo das fassadenablaufende Wasser auf das Spritzwasser und das Oberflächenwasser der gebäudeangrenzenden Flächen trifft. Hier muss alles dafür getan werden, dass Pfützenbildung direkt am Mauerwerk vermieden wird. Außerdem sollte ein besonderer Spritzwasserschutz – wie ihn die DIN 18 195 für Neubauten vorsieht – auch am Fuß historischer Mauern konstruktiv ausgebildet werden, beispielsweise als Rabatte aus großen Kieseln am Sockel entlang (Abb. 4.3).

Perforierte Dachrinnen und defekte oder nicht an die Grundleitung angeschlossene Regenwasserabläufe, also anthropogene Ursachen, durchnässen das Außenmauerwerk eines Gebäudes, ebenso wie an der Außenwand angeordnete, schadhafte Fallschächte von Aborten, Rohrleitungen von Wasserklosetts und alle anderen wasserführenden, undichten Leitungen (Abb. 4.4).

Früher und oft auch heute noch wird versucht, durch Fliesenbeläge, Verkleinerung oder Zementmörtelbeschichtung auf dem Haussockel die Schäden durch kapillar aufsteigende Feuchte zu verhindern. Da aber die Feuchte nun nicht mehr direkt über den Haussockel verdunsten kann, steigt sie über den Haussockelbelag hinauf und verursacht dort die typischen Verdunstungsschäden (Abb. 4.5).

In der Erde befindliche Feuchte, in den Baugrund eindringendes Sickerwasser und schließlich hydrostatisch drückendes, sich am Mauerwerk vor allem in bindigen Böden aufstauendes Wasser dringen in das erdberührte Mauerwerk ein (Weber 2000). Den nicht bindigen Baugrund durchfeuchtendes Sickerwasser bildet eben-

Abb. 4.4 Das schadhafte Regenfallrohr ist die Ursache für den Wasserschaden in der Wand



Abb. 4.5 Die verklinkerte Sockelzone bewirkt das Aufsteigen der Feuchte über sie hinauf. Sie lässt dabei bauschädliche Salze oberhalb der Klinker im Wandputz auskristallisieren



falls zusammen mit der Erdfeuchte die nur geringfügig stauende Bodenfeuchte, die allerdings mit der vorhandenen Baufeuchtigkeit zusammen ebenfalls die Mauern bauschädigend befeuchten kann. An vielen alten Gebäuden fehlt außerdem eine geeignete vertikale Abdichtung. Deshalb kann schon die bloße Erdfeuchte im Verbund mit der Baufeuchtigkeit durchaus Bauschäden bewirken.

Gefährlicher jedoch wird es, wenn sich als Folge von Grundwasserströmen ein hydrostatischer Druck aufbaut, also drückendes Wasser entsteht. Daran kann mitunter auch eine defekte Kanalleitung oder eine nicht mehr funktionierende Dränage schuld sein. Drückendes Wasser kann auch dadurch entstehen, dass infolge einer baulichen Änderung am Nachbargebäude, etwa durch den Einbau einer Tiefgarage, das gesamte Grundwasserreservoir gestört wird. Eine durchaus mehrere Straßen entfernt liegende Nachbarbaustelle und deren Wasserhaltung kann ebenfalls den gesamten Grundwasserstrom massiv beeinträchtigen, so dass der Störfall drückendes Wasser nicht dauerhaft sondern nur temporär vorhanden ist. Das Wasser dringt nun entweder wegen fehlender vertikaler Abdichtung ungehindert oder durch Risse und

Abb. 4.6 Die kapillar aufsteigende Feuchtigkeit verdunstet im Sockelbereich nach außen



Fehler in der Abdichtung in das Kellermauerwerk ein. Dann erreichen alle Poren des erdberührenden Mauerwerks recht schnell ihre Sättigungsfeuchte und die Wand ist nass. Das Wasser dringt schließlich durch das poröse Mauerwerk hindurch und versucht auf der Innenseite zu verdunsten. Infolgedessen wird die innere Oberfläche des Mauerwerks zerstört (Abb. 4.6).

Kapillare Wasseraufnahme Hierbei handelt es sich um den bekanntesten Wasseraufnahmemechanismus, der gleichwohl zumeist nicht verstanden wird. Der Vorgang spielt sich folgendermaßen ab: Kommt ein trockenes Mauerwerk mit Wasser in Berührung, dann saugt es dieses, insoweit es seine Porengeometrie zulässt, in sich auf. Es füllen sich die Makro- und die Kapillarporen des Baumaterials. Zu Beginn des Saugvorgangs hängt die kapillare Sauggeschwindigkeit direkt vom Durchmesser der mehr oder minder feinen Kapillaren bzw. vom Kapillarradius, also von den zusammenhängenden Porenräumen des Mauerwerks ab (Wittmann 1986, 1995). In grobkapillaren Baustoffen, also in solchen mit großen Kapillarradien, ist die anfängliche Sauggeschwindigkeit wesentlich größer als in Systemen mit feinen Kapillaren. Dies lässt sich bei einem Praxisversuch deutlich beobachten: ein Porenbetonstein saugt anfangs Wasser wesentlich schneller auf als etwa ein Mauerziegel oder gar ein feinkörniger Naturstein. Es gibt durchaus auch Steine, z. B. Granit, Quarzit oder Basalt, deren Porengeometrie so klein ist, dass kein nennenswertes Aufsaugen von Feuchtigkeit stattfindet.

Die anfängliche Sauggeschwindigkeit nimmt mit der Steighöhe des Wassers im Mauerwerk und mit zunehmender Verdunstung an seinen Außenflächen allmählich ab und hört gänzlich auf, wenn die maximale, also die dem Kapillarradius umgekehrt proportionale Steighöhe erreicht ist. Ein feinporiger Baustoff wird also, wenn er nur lang genug im Wasser liegt, eine höhere maximale Steighöhe aufweisen als ein grobporiger Mauerstein, obwohl seine Sauggeschwindigkeit wesentlich kleiner ist. Für jeden mineralischen Baustoff und damit für jedes Mauerwerk stellt sich in des jeweils individuell ein die Durchfeuchtungshöhe betreffender Gleichgewichtszustand ein, der im wesentlichen von der kapillaren Leistungsfähigkeit, dem Produkt aus maximaler Steighöhe und Sauggeschwindigkeit, sowie der Verdunstungs-

Abb. 4.7 Die Kellerwand ist bis in Höhe des Haussockels feucht, oberhalb aber infolge Verdunstung nach innen trocken



rate bestimmt wird. Wenn also die kapillare Leistungsfähigkeit des Mauerwerks geringer ist als seine Fähigkeit, Wasser zu verdunsten, so steigt die Durchfeuchtung nicht mehr höher hinauf, es stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein.

Das lässt sich an alten Kellern sehr gut beobachten: Die Kelleraußenmauer nimmt kapillar Wasser auf und ist solange sie sich im Erdreich befindet, also meistens bis hinauf zum Haussockel, nass. Der Sockel selbst bildet jedoch eine Verdunstungszone, welche die Feuchte an die Umgebungsluft abführt. Die Durchfeuchtung der Kellerwand steigt nun nicht mehr höher hinauf, die Kellerdecke ist vor Nässe geschützt; es sei denn, man zerstört diese Verdunstungszone einerseits durch nachträgliches Abdichten entweder mit einem Fliesenbelag oder einem Zementputz, andererseits durch Höherlegen des Straßenniveaus, bis der Haussockel ebenfalls im Erdreich verschwindet und als Verdunstungszone ausfällt. Die Wasser verdunstende Sockelzone ist jedoch durch bauschädliche Salze stark gefährdet (Abb. 4.7).

Steht nämlich ein historisches Mauerwerk dauernd in Kontakt mit feuchtem Erdreich, so zieht es durch die kapillare Saugfähigkeit selbstverständlich nicht etwa reines Wasser, sondern eine wässrige Lösung mit einem charakteristischen Anteil an Salzionen nach oben. Beim Eintritt der Lösung ins Mauerwerk ist – abhängig von dessen Porengeometrie – mit einem mehr oder weniger ausgeprägtem Filtereffekt zu rechnen. Ab einer bestimmten Höhe im Bauteil verdunstet gerade soviel Wasser wie durch kapillare Saugkraft aufgenommen werden kann. Dadurch wird die wäs-

serige Lösung beständig konzentrierter bis der Sättigungsgrad des jeweils gelösten Ions erreicht ist. Ab diesem Moment wird das durch weiteres Trocknen entstehende überschüssige Salz entweder in den Poren oder an der Mauerwerksoberfläche, also zumeist in der Sockelzone des Gebäudes, ausgeschieden. Es entstehen zumeist weiße Ausblühungen (Mayer et al. 1995).

Die kapillare Wasseraufnahme wird also im wesentlichen von der spezifischen kapillaren Leistungsfähigkeit eines Baustoffes bestimmt. Darum gibt es sowohl bei sehr feinkapillaren als auch bei sehr grobkapillaren Baustoffen keine aufsteigende Feuchtigkeit. Dies haben selbstverständlich auch schon die alten Baumeister gewusst und deshalb bei Wasserbauten, etwa bei Schlossmauern in Wassergräben, sehr feinporiges Sandsteinmaterial eingesetzt (Maier 2005). Andererseits finden sich deshalb ganz absichtlich sehr grobporige Tuffe in den Fundamentmauern alter Bauwerke.

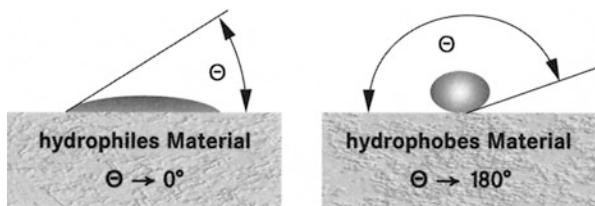
Ein weiterer Faktor zur Veränderung der Steighöhe von Wasser in einem Baustoff ist der Benetzungswinkel oder Randwinkel des Wassertropfens, den dieser mit dem mineralischen Untergrund bildet. Bei normal saugfähigen Baustoffen stellt sich im Grenzfall ein Benetzungswinkel von 0° ein. Der Kosinus beträgt dann den Wert eins und kann somit aus den Überlegungen zur Steighöhe herausgelassen werden. Belegt man jedoch die Porenwandungen mit Substanzen, welche die Benetzung erschweren oder gar unmöglich machen, verändert sich folgerichtig auch der Benetzungswinkel. Wird er dabei größer als 90° , ergibt sich für den Kosinus ein negativer Wert, was schließlich eine negative Steighöhe bedeutet. Unter diesen Bedingungen entsteht also Kapillardepression, was bedeutet, dass die kapillare Wasseraufnahme umgedreht wird und das kapillar aufgenommene Wasser im Baustoff absinkt. Ein theoretischer Benetzungswinkel von 180° würde bedeuten, dass der Wassertropfen an der Porenwand schwebt oder an der Oberfläche der Mauer berührungslos abperlt (Abb. 4.8.).

Die kapillare Wasseraufnahme von Baustoffen wird außerdem noch durch den Wasseraufnahmekoeffizienten w in $\text{kg}/\text{m}^2 \text{h}^{0.5}$ beschrieben. Wird ein Mauerwerk wasserhemmend gestaltet, dann muss sein Wasseraufnahmekoeffizient $w \leq 2,0 \text{ kg}/\text{m}^2 \text{h}^{0.5}$ sein, soll es Wasser abweisen, dann muss $w \leq 0,5 \text{ kg}/\text{m}^2 \text{h}^{0.5}$ sein. Während der Wasseraufnahmekoeffizient w die beim Eintauchen eines Baustoffes in Wasser aufgesaugte Wassermenge, bezogen auf die Saugfläche, angibt, beschreibt der Wassereindringkoeffizient B die Wanderung der Wasserfront im Baustoff. Der Feuchtigkeitsgehalt bei kapillarer Durchfeuchtung des Baustoffs, die Wasserkapazität Φ_k , ist – wie bereits beschrieben – kleiner als die Sättigungsfeuchte Φ_s , wenn alle Kapillaren und Poren gefüllt sind.

4.2.2 Wasserandrang in Form von Wasserdampf

Kondensation Das Abscheiden von Wasserdampf aus der Atmosphäre nennen die Bauphysiker Kondensation. Besonders häufig wird Wasseraufnahme durch Wasserdampfkondensation unterschätzt, wohl deshalb, weil dieser Vorgang für den Menschen unsichtbar vor sich geht. Regen, Wasser im Boden oder Flüssigkeitsfilme

Abb. 4.8 Benetzung einer hydrophilen und einer hydrophoben Oberfläche



auf Bauteiloberflächen sind als Quelle für eindringendes Wasser für jedermann leicht fassbar; Feuchtigkeit aus der das Mauerwerk umgebenden Luft dagegen jedoch nicht. Bekanntlich enthält die uns umhüllende Luft immer einen gewissen Teil Wasserdampf. Bei einer bestimmten Temperatur kann aber nicht beliebig viel Wasserdampf in der Luft sein, weil die Sättigungsmenge eine Funktion der Temperatur ist.

Der jeweils aktuell vorhandene Wasserdampfgehalt der Luft wird als „*relative Luftfeuchtigkeit*“ bezeichnet und in Prozentwerten determiniert. Dieser Begriff gibt an, wieviel Prozent Feuchtigkeit die Luft bei der jeweiligen Temperatur aufweist, also das prozentuale Verhältnis von tatsächlichem Feuchtigkeitsgehalt zur Sättigungsfeuchte. Bei 20 °C kann z. B. die tatsächlich in der Luft vorhandene Wassermenge maximal 17,29 g/m³ betragen. Dann spricht man von 100 % relativer Luftfeuchtigkeit, die Luft ist mit Wasserdampf gesättigt. Wird dem Luftgemisch darüber hinaus Dampf zugeleitet, so muss dies notwendigerweise zur Kondensation, also zur Ausscheidung des überschüssigen Dampfgehaltes in Form von Wasser, führen, denn ihr sog. „*Taupunkt*“ wird nunmehr überschritten.

Kondensation tritt also immer dann auf, wenn der jeweilige Taupunkt der Luft erreicht worden ist und durch Aufnahme weiterer Feuchtigkeit übertroffen wird. Normalerweise besitzt die Luft in Innenräumen eine relative Luftfeuchtigkeit von vielleicht 20 bis 60 %. Kühlt man sie ab, so wird schnell ihre Sättigungsmenge überschritten: Kondensation tritt ein. Ist die Wandoberfläche kälter als die Raumluft, so kann die Luftfeuchtigkeit bereits an ihr kondensieren, so wie das an den Fensterscheiben sehr viel deutlicher zu sehen ist. Der Volksmund spricht dann von „*Schwitzwasser*“. Aber nicht nur an der Oberfläche eines Mauerwerks, sondern auch in seinem Inneren ist Kondensation möglich. Gerade diese innere Kondensation ist besonders gefährlich, weil sie durch Augenschein überhaupt nicht wahrzunehmen ist (Abb. 4.9).

Durch Oberflächenkondensation von Wasserdampf aus der Umgebungsluft wird Mauerwerk durchfeuchtet. Um diesen Vorgang bewerten zu können, müssen folgende Parameter bekannt sein: einmal die aktuelle Raumtemperatur, dann die zugehörige relative Luftfeuchtigkeit der Raumluft und schließlich die Temperaturreteilung im Bereich der Wandflächen. Wenn beispielsweise im Raum bei einer Lufttemperatur von 20 °C eine relative Luftfeuchtigkeit von ca. 50 % vorhanden ist – das sog. Normklima in Wohnräumen –, so genügt eine Oberflächentemperatur an seiner Außenwand von etwas weniger als 10 °C, um dort den Taupunkt der Luft zu überschreiten, die Kondensation an der Wandoberfläche beginnt.

Abb. 4.9 Wasser kondensiert auf einem nicht gedämmten Fenster in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit



Es ist leicht einzusehen, dass entweder das äußere Mauerwerk aufgewärmt oder die relative Luftfeuchtigkeit gesenkt werden muss, um Kondensation auf der Wandoberfläche zu vermeiden. Die alten Öfen haben durch ihre Wärmestrahlung tatsächlich die Außenwandoberflächen entsprechend aufgeheizt. Die modernen Heizungen jedoch schaffen dies nicht mehr, es muss also eine wirksame Wärmedämmung an der Außenwand angebracht werden.

Das Absenken der relativen Luftfeuchtigkeit kann durch Lüften geschehen. Dies haben in alten Gebäuden insbesondere die undichten Fenster geleistet. Die modernen, sehr dichten Fenster erfordern dagegen ein besonderes Lüftungsverhalten der Bewohner. Früher lagen die Luftwechselzahlen deutlich höher als heute. Dies hatte zur Folge, dass die absolute Feuchte der Raumluft im Winter aufgrund der dauern den Lufterneuerung recht niedrig, die relative Luftfeuchtigkeit dagegen wegen der geringen Aufwärmung des Raumes vergleichsweise hoch lag.

Bei $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ beträgt die Sättigungsmenge der Luft nur $4,84\text{ g/m}^3$. Durch Aufwärmen des Raumes sinkt die relative Luftfeuchtigkeit rasch, bei $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ beträgt sie noch 44 %, bei $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ nur noch 32 % und schließlich bei $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ gar nur noch 23 %. Umgekehrt wird durch Abkühlung der Luft von $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ der Taupunkt bereits überschritten.

Bei den im Winter häufig auftretenden Außentemperaturen zwischen 0 und $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt die relative Feuchte der Luft häufig wenig unter 90 %. Bei einer Temperatur

der Raumluft von 15 °C, wie sie früher in Wohnräumen üblich war, fiel die relative Luftfeuchte im Raum zumeist auf bis zu 32 %, bei heutigen Komfortansprüchen jedoch benötigt der Bewohner eines Raumes eine wesentlich höhere Raumlufttemperatur, etwa 20 bis 22 °C. Dabei sinkt die relative Luftfeuchte im Raum auf Werte von 23 % und darunter ab. Man erreicht also durch Lüften im Winter eine trockene Raumluft, die infolge ihrer sehr geringen relativen Luftfeuchtigkeit weitere Feuchte aus den Bauteilen aufzunehmen in der Lage ist. Feuchte Raumoberflächen beginnen daher zu trocknen. Damit die Luft nicht zu trocken wird, sind zusätzliche Raumbefeuchter etwa an den Heizkörpern durchaus sinnvoll.

Der Tauwasserschutz für den Bauteilquerschnitt wird in DIN 4108-3, *Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz; Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung* ausführlich behandelt. Nach DIN 4108-3 darf die Tauwassermenge W_t im Winter insgesamt $1,0 \text{ kg/m}^2$, an Berührungsflächen von kapillar nicht wasseraufnahmefähigen Schichten darf $W_t \leq 0,5 \text{ kg/m}^2$, bei Holz $W_t \leq 0,05 \text{ kg/m}^2$ nicht überschreiten. Noch niedriger muss die Tauwassermenge bei Holzwerkstoffen sein.

Diese Werte für den Tauwasserausfall mussten bislang nach dem graphischen Verfahren von Glaser mit Hilfe des Diffusionsdiagramms im Regelquerschnitt rechnerisch oder durch geeignete Konstruktionen nachgewiesen werden, obwohl dieses Verfahren, weil es sich nur auf eine einzige Dimension, nämlich ausschließlich auf die Wasserdampfdiffusion bezog, sehr ungenau gewesen ist. Heute gibt es wesentlich genauere, auch Niederschlag, Baufeuchte oder kapillar aufsteigende Feuchte einbeziehende, analytische Berechnungsverfahren, insbesondere die hygrothermische Simulation wie z. B. das am Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, entwickelte Verfahren WUFI® oder das vom Institut für Bauklimatik der TU Dresden entwickelte Verfahren COND®. Im Sommer muss die Tauwassermenge der Menge an verdunstetem Wasser entsprechen. Die im Sommer durch Verdunstung abführbare Wassermenge lässt sich ebenfalls nach den genannten Berechnungsverfahren bestimmen (Künzel et al. 2006).

Kapillarkondensation Eine weitere Form des Wasserausfalls im Bauteilinneren stellt die Kapillarkondensation dar. Der englische Physiker Kelvin hat gezeigt, dass der Sättigungsdampfdruck in feinen Kapillaren gemindert wird. Dadurch tritt in der Kapillare mit einem geringen Durchmesser bereits dann schon Kondensation ein, wenn der Dampfdruck in ihr noch unter dem Sättigungsdampfdruck liegt. Die Kapillare füllt sich infolgedessen mit Wasser. In Zusammenhang mit der Kapillarkondensation spricht man manchmal von „*materialinternem Klima*“. Dieses wird insbesondere durch das unmittelbar an einem porösen Bauteil herrschende Mikroklima beeinflusst. Wichtig sind dabei die Orientierung des Bauteils zur Sonne, die durch die umgebende Bebauung beeinflussten Windverhältnisse sowie die variable Temperatur und Feuchtigkeit als Folge der jeweils individuellen Nutzung der angrenzenden Räume.

Hygrokopische Feuchteaufnahme Hygrokopische Wasseraufnahme entsteht durch die Hygrokopizität. Dies ist die Eigenschaft eines Baustoffes, Luftfeuchte

Abb. 4.10 Die Außenwand wurde durch ein Gemenge von verschiedenen Feuchte-aufnahmemechanismen total geschädigt. Dabei spielte die Hygroskopizität eine entscheidende Rolle



aus der Umgebungsluft aufzunehmen und zu binden. Dies geschieht insbesondere durch Salzkonzentration der in jedem mineralischem Baumaterial vorhandenen Salze. Salze können in mineralischen Baustoffen primär vorhanden sein oder entstehen bei seiner Erhärtung. Sie werden aber auch durch Kontakt mit der Umwelt, besonders der Atmosphäre oder anstehendem Wasser in den Baustoff hinein transportiert. Andererseits können sie als Folge einer Behandlung des Mauerwerks, etwa einer Konservierungs- oder Reinigungsmaßnahme, oder infolge des Kontakts mit anderen, angrenzenden Baustoffen in diesem selbst entstehen (Nägele 1992).

Durch die aufsteigende Feuchtigkeit werden in mineralischen Baustoffen vorhandene Salze gelöst und mitgenommen. An den Stellen, an denen das Wasser infolge der Austrocknung des Mauerwerks verdunstet, zumeist an seiner Oberfläche, werden die Salze ausgeschieden. Die Salzkristalle füllen die Poren der oberflächennahen Bereiche der mineralischen Baustoffe und sprengen diese schließlich auf. Das trockene, salzhaltige, poröse Material nimmt hygroskopisch ein Vielfaches der Wassermenge eines salzfreien Materials auf.

Die Salze sind in der Lage, Wasser im Zuge der Ausgleichsfeuchte durch Sorption auch aus der Umgebungsluft zu binden. Dadurch werden von bauschädlichen Salzen befallene Bauteile auch dann nass, wenn keinerlei Feuchtigkeit kapillar aufsteigt. Im Mauerwerk alter Gebäude kann sich im Verlaufe von Jahrzehnten oder Jahrhunderten sehr viel Salz anlagern. Solche Mauern sind in aller Regel ständig feucht, ihre Oberfläche ist völlig zermürbt (Abb. 4.10).

Mineralische Baustoffe, insbesondere Natursteine, quellen unter Feuchtigkeitseinfluss. Die Längen- bzw. Volumenzunahme ist abhängig von der Porenstruktur, den Mineralphasen der Baustoffe und vor allem vom Feuchtigkeitsgehalt. Salzbelastung ändert die Feuchtigkeitsaufnahme der mineralischen Baustoffe hygroskopisch und damit das feuchtigkeitsabhängige Volumen. So können beispielsweise mit Steinsalz belastete Sandsteine bereits wesentlich eher ihre maximale Quellung erreichen, die bei salzfreien Steinen erst im überhygroskopischen Bereich auftritt. Die meist mit Gips angereicherte Oberfläche von verbauten Sandsteinen kann bei der hygroskopischen und kapillaren Wasseraufnahme bis zum zehnfachen Betrag gegenüber dem nicht kontaminierten Gesteinskern quellen. Bei Sandsteinen, die über eine lange Zeit

Abb. 4.11 Im Bereich der bodennahen Zone ist die Wand kälter, daher kondensiert Wasser und lässt mitgebrachte Salze ausblühen



den Umwelteinflüssen ausgesetzt waren, reichern sich die Salze im Porengefüge an an den Kornzwickeln und Kornkontakte an und können so in beschränktem Maß die Funktion des Bindemittels übernehmen. Diese Salze können ähnlich den Tonmineralien Änderungen ihres Volumens oder Teilchenabstandes bei der Feuchtigkeitsaufnahme auf das Sandsteingefüge übertragen, und es dabei zerstören.

Der Salztransport in porösen Baustoffen führt – wie gesagt – dazu, dass da, wo das Wasser verdunstet, die Salzkonzentration steigt. Wenn eine konzentrierte Salzlösung durch eine semipermeable Membran z. B. aus gebranntem Ziegel vom Lösungsmittel Wasser getrennt ist, so versucht das System durch die Membran hindurch einen Konzentrationsausgleich zu erreichen. Diesen Vorgang nennt man Osmose. Die Wassermoleküle sind aber beweglicher als die gelösten Salzionen. Damit wandern pro Zeiteinheit mehr Wassermoleküle in die Zonen hoher Salzkonzentration. Wenn sich im porösen System dadurch ein Druck aufbauen kann, so kommt dieser Vorgang zum Stillstand, sobald der osmotische Druck der Salzlösung erreicht ist. Dies bedeutet, dass Zonen im Mauerwerk, in denen eine hohe Salzkonzentration vorhanden ist, im Zuge der Osmose viel Wasser aufnehmen und dieses Wasser wiederum in die Poren des Bauteilinneren verlagern. Zusammen damit werden häufig auch zusätzlich gelöste Salze in das Bauteil hinein transportiert. Die Problematik stellt sich insbesondere bei den meisten Verfahren zur Mauerwerksent-salzung (s. Kap. 7.1.4).

Oft übertrifft die hygrokopische Feuchte die kapillar aufsteigende. Darum ist es unerlässlich, durch Probenahmen die Art der Feuchte zu untersuchen, um unsinnige und zudem teuere Maßnahmen gegen tatsächlich gar nicht vorhandenes, kapillar aufsteigendes Wasser zu vermeiden.

Wasserdampfdiffusion Die Wasserdampfdurchlässigkeit eines Mauerwerks spielt für jedes Gebäude eine zentrale Rolle. Wasserdampf besitzt wie alle Gase die Fähig-

Tab. 4.3 Diffusionswiderstandszahl und Dampfwiderstand einiger Baustoffe

Material	Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ	Übliche Schichtdicke s (cm)	Dampfwiderstand (gleichwertige Luftsichtdicke) $s_d = \mu s$
<i>Natursteine</i>			
Granit, Syenit	≥ 400	60	24.000
Diorit, Gabbro			
Porphyre			
Basalt			
Basaltlava			
Diabas			
Trachyt			
Quarzit, Grauwacke	≥ 400	60	24.000
Quarzitische Sandsteine	20–50	40	800–2.000
Sonstige Sandsteine			
Dichte Kalksteine	50–200	40	2.000–8.000
Sonstige Kalksteine			
Travertin			
Vulkanische Tuffsteine	10	40	400
<i>Moderne Baustoffe</i>			
Kiesbeton	70–150	20	1.400–3.000
Mauerziegel	50–100	24	1.200–2.400
Klinkerplatten	380–470	3,0	1.000–1.400
Kalkputz	15–35	2,5	37,5–87,5
Zementputz	15–35	2,5	37,5–87,5
Sanierputz	< 12	3,0	< 36
Kunstharzputz	50–200	0,2	10–40
Heißbitumen	85.000–105.000	0,1	8.500–10.500 (Praktisch dampfdicht)
Holzbretter	40	2,0	80
Dachdichtungsbahnen	(Praktisch dampfdicht)	(Praktisch dampfdicht)	(Praktisch dampfdicht)
Gussasphalt	(Praktisch dampfdicht)	(Praktisch dampfdicht)	(Praktisch dampfdicht)
PVC-Folien	20.000–50.000	0,0004	8–10
Alu-Folien	(Praktisch dampfdicht)	(Praktisch dampfdicht)	(Praktisch dampfdicht)
Styropor	20–50	0,20	4–10
Schaumglas	(Praktisch dampfdicht)	(Praktisch dampfdicht)	(Praktisch dampfdicht)
Faserdämmstoffe	1	0,20	0,20

Werte für Natursteine entnommen aus Schubert, Tab. 14, die übrigen Werte aus Scholz Taf. 16.2

keit, durch feste Stoffe hindurch zu wandern. Diesen Vorgang nennt man Diffusion. Die Wanderung wird immer durch ein Konzentrationsgefälle von einer Wandseite zur anderen ausgelöst. Die Wand atmet also nicht, wie gemeinhin oft gesagt wird, sondern es findet ein Druckausgleich zwischen drinnen und draußen statt.

Dabei ist der Temperaturunterschied zwischen beiden Mauerwerksoberflächen signifikant. Im Winter tritt außen eine wesentlich niedrigere Temperatur auf als im beheizten Inneren des Gebäudes. Die wärmere Luft innen vermag größere Mengen Wasser in Dampfform zu binden. Im Zuge des Konzentrationsausgleichs diffundiert die Feuchtigkeit durch das Mauerwerk. Wird sie durch zu dichte Schichten wie etwa einem dichten Außenanstrich behindert und kühl ab, fällt die Feuchtigkeit als flüssiges Wasser aus und verursacht entsprechende Schäden, wie bereits oben im Zusammenhang mit der Kondensation ausgeführt wurde (Abb. 4.11).

Die wichtigste Messgröße der Diffusion ist die Diffusionswiderstandszahl μ . Sie gibt an, um wieviel der Diffusionswiderstand eines Baustoffes größer ist als der einer gleich dicken, äquivalenten Luftschicht s_d . μ ist eine Materialkonstante, ihre Bestimmung erfolgt nach DIN 52 617. Die Dicke jeder einzelnen Mauerwerkschicht wie Wandfassung, Innenputz, Sandsteinmauerwerksschale innen, Füllschicht bzw. Hohlräume in ihr, Mauerwerksschale außen, Außenputz und schließlich Farbfassungen außen beeinflusst selbstverständlich den Diffusionsdurchgang. Das Produkt aus der Addition der einzelnen Schichtdicken s und der Diffusionswiderstandszahl μ bestimmt den Diffusionsdurchgang.

Eine Wand, die eine ungehinderte Diffusion ermöglichen soll, muss von innen nach außen ein Diffusionsgefälle aufweisen. Der s_d – Wert = μs jeder Schicht sollte von innen nach außen abnehmen. Beispielsweise wäre folgende Wand richtig aufgebaut, nämlich mit einem von innen nach außen abnehmenden s_d – Wert: 0,36 m Mauerziegel mit $\mu=10$, $s_d=3,6$ m, 0,02 m Außenputz mit $\mu=50$, $s_d=1,0$ m und darauf 2×10^{-4} m Anstrich mit $\mu=1000$, $s_d=0,2$ m. Falsch aufgebaute Wände, bei denen der s_d – Wert von innen nach außen steigt, verhindern dagegen die Wasserdampfdiffusion und sorgen dafür, dass der Wasserdampf im Mauerwerk bleibt. Fällt die Mauerwerkstemperatur aber ab, wird schnell der Taupunkt unterschritten, der Dampf kondensiert. Das Kondenswasser durchfeuchtet infolgedessen den Mauerwerkskern und es beginnen alle damit verbundenen Mechanismen mit ihren schädlichen Folgen (Tab. 4.3).

Die Tab. 4.3 zeigt, dass viele Natursteine dem Wasserdampf einen erheblichen Widerstand entgegensetzen, sie sind annähernd dampfdicht. Sie benötigen deshalb auch keine weiteren Schutz, etwa eine Dampfbremse, um das Eindringen von Wasserdampf zu verhindern.

Anders liegen die Verhältnisse bei den Mauerziegeln und den Putzen. Die mit ihnen gebauten Wände sollten stets wasserdampfdurchlässig ausgebildet werden.

Der Eigentümer eines Gebäudes erkennt leicht die unausweichliche Notwendigkeit einer Instandsetzungsmaßnahme anhand der auffällig gewordenen Unbrauchbarkeit. Er wird sich vor allem dann, wenn die Schäden die Nutzung allmählich immer mehr erschweren und schließlich unmöglich machen, an einen Fachmann wenden müssen, der den Verfall abwenden soll. Ein versierter Architekt, Ingenieur oder Restaurator im Maurerhandwerk kann schon bei der ersten Begehung eines Gebäudes gleichsam auf den ersten Blick eine Reihe von Schäden anhand typischer Schadensbilder erkennen. Dabei muss das Mauerwerk stets in seinem baukonstruktiven Kontext betrachtet werden: es steht zunächst in aller Regel mit oder ohne Fundament auf einem mehr oder minder tragfähigen Baugrund; es ist entweder innen und außen verputzt, verbandelt oder roh belassen, es trägt entweder eine Stockwerksdecke aus verschiedensten Materialien, ein Gewölbe oder eine Mauerkrone (Abb. 5.1).

5.1 Feuchteschäden

Feuchteschäden entstehen grundsätzlich durch in das Mauerwerk eindringendes Wasser. Für das Eindringen benutzt es – wie in Kap. 4 bereits beschrieben – hauptsächlich drei Wege: zunächst von außen über die Mauerwerksoberfläche, des weiteren physikalische und chemische Wirkungsmechanismen im Mauerwerk selbst und schließlich Wege, die ihm sog. „*hausgemachte oder anthropogene*“ Instandsetzungs- und Nutzungsfehler oder unterlassene, rechtzeitige Reparaturmaßnahmen eröffnen.

Historische, gemauerte Fundamente reichen zumeist nicht tief genug in den Baugrund hinab, infolgedessen sind sie dem Oberflächenwasser ausgesetzt und daher auch nicht frostsicher. Dieser Umstand war bei der großen Auflast auf den meisten alten Mauerwerksfundamenten und der Dicke der alten Mauern für die Standsicherheit normalerweise unerheblich. Im Laufe der Zeit konnten die Frost-Tau-Wechsel dennoch erhebliche Schäden anrichten, wenn die Fundamente nur lange genug im Nassen standen. Dieser Vorgang zermürbte den Kalkmörtel in den Fugen der Fundamentmauern, er wurde bröselig, rissig und durch den Sprengdruck bei der Kristallbil-

Abb. 5.1 Das Haus in der Altstadt von Erfurt zeigte 1990 beim ersten Hinsehen eine Fülle von Bauschäden



dung des Eises auseinandergetrieben. Damit wurde die an sich kraftschlüssige Konstruktion von außen her für Wurzeln von Bäumen und Sträuchern angreifbar. Das Wurzelwachstum sprengte die Fugen noch weiter auf, das von den Wurzeln freigesetzte CO_2 reagierte außerdem mit den Steinen und schädigte das Mauerwerk zusätzlich.

Hand in Hand mit den durch Sprengdruck verursachten Schäden infolge der Frost-Tau-Wechsel gehen diejenigen, die durch im Boden ständig vorhandenes Wasser oder Feuchte auch ohne Frost bewirkt werden. Anstehendes Grundwasser wäscht das Bindemittel Kalk aus dem Mörtel des Fundamentes aus; ein natürlicher Vorgang, wie er auch in Tropfsteinhöhlen zu beobachten ist. Dadurch verliert der Mörtel seine Bindekraft; das Fundamentmauerwerk wird durch das Gewicht des auf ihm lastenden Mauerwerks auseinandergetrieben. Das gesamte Fundamentgefüge ist nunmehr locker und nicht mehr tragfähig.

Die Schadensbilder an Fundamentmauern lassen sich durch einige einfache Sondagen erkennen, die man mehrere Tage vor der ersten Ortsbegehung anfertigen lässt. Erst wenn an den verschiedenen Mauerecken die Fundamente freigelegt wurden, lässt sich zum einen der Grundwasserstand messen und zum anderen lassen sich die vorhandenen Schäden punktuell erkennen: Der Fachmann sieht die ausgewaschenen oder bröselnden Fugen, die lose liegenden Mauersteine und das Wurzelwachstum. Er misst die Fundamenthöhe und nimmt zugleich damit zur Kenntnis,

Abb. 5.2 Anstehendes Grundwasser wird in der Sondage gemessen und überprüft



ob überhaupt ein nennenswertes Fundament vorhanden ist und auf welchem Boden es errichtet worden ist. Er sieht das Grundwasser, das die Fundamente umspült (Abb. 5.2).

Die gleichen Schäden wie an den Fundamenten lassen sich oft auch am aufgehenden Mauerwerk beobachten. Der Gutachter sollte sie vom Anfang seiner Untersuchungen an mit Hilfe eines vorgegebenen Orientierungssystems, das während der gesamten Instandsetzungsmaßnahme durchgeholt wird, erfassen (s. Kap. 6; Abb. 5.3).

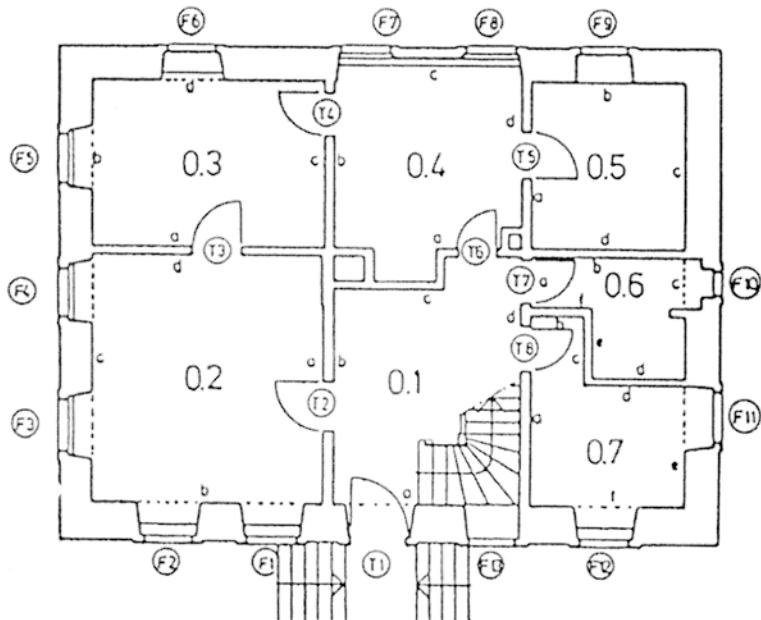


Abb. 5.3 Orientierungssystem. (Nach Schmidt 1989)

Abb. 5.4 Melsungen, Bartenwetzerbrücke vor der Sanierung. Schäden bis ca. 5 mm Tiefe



5.1.1 Schäden an Natursteinmauerwerk

Vier gravierende, vor allem durch Feuchte verursachte Schadensarten lassen sich speziell an einer Natursteinmauer aus Sandstein in aller Regel mit dem bloßen Auge beobachten:

- Verwitterte Bereiche mit geringen Schäden, also etwa absandende, abmehlende, abpudernde oder verschmutzte Oberflächen, bis maximal 5 mm Tiefe. Sie lassen sich je nach Festigkeit der verwendeten Gesteinsart meistens an bis zu 85 % der Mauerfläche feststellen (Abb. 5.4).
- Einzelne, stark morbide, abblätternde Bereiche bis etwa 40 mm Tiefe an solchen Steinpartien, die einer stärkeren Wassereinwirkung ausgesetzt waren, obwohl sie bündig in der übrigen Fassadenfläche liegen. Es handelt sich dabei meist um die unteren Steine der Fenstergewände, die Steine der umlaufenden Gurtgesimse, die Ecksteine der westlichen Außenwand, sowie um einen Teil der unteren Sockelsteine, die durch Oberflächen- und Spritzwasser beeinträchtigt worden sind (Abb. 5.5).
- Sehr stark geschädigte Bereiche mit einer Zerstörung bis in 15 cm Tiefe an aus der Fassade hervorspringenden, zumeist profilierten oder anderweitig künstlerisch gestalteten Steinpartien. Es haben sich Krusten oder gar Schalen gebildet, die vom Frost abgesprengt wurden. Es handelt sich dabei meist um Gurtgesimse, Fenstersohlbänke und -verdachungen (Abb. 5.6).
- Bereiche in Bodennähe, die durch Oberflächenwasser, Schnee und Streusalz sehr stark angegriffen worden sind. Hier können die Steine bis in Tiefen von 20 cm und mehr zerstört worden sein (Abb. 5.7).

Das zuletzt beobachtete Schadensbild lässt sich selbstverständlich an allen Mauerwerksarten, sowohl an Naturstein- als auch an Backsteinmauerwerk, feststellen.

5.1.2 Schäden an mehrschaligen Mauerwerken

Nur an mehrschaligen Mauerwerken tritt das nächste, von Feuchte verursachte Schadensbild auf:

Abb. 5.5 Die Sandsteine der Süd-West-Ecke der Alten Polizei in Pegau zeigten 1993 Schäden bis 40 mm Tiefe



- Weiße „*Fahnen*“ auf der Mauerwerksoberfläche; es handelt sich dabei um Kalkausblühungen, die infolge Kalkauswaschung aus der inneren Füllschicht des zweischaligen Mauerwerks sich an der Oberfläche abgelagert haben. Diese Kalkwanderung an die Mauerwerksaußenseite kann bei genügend langer Dauer sogar starke Krusten bilden (Abb. 5.8).

Oft wird behauptet, dass die Schmutzkruste außen auf den Steinen diese nicht weiter schädige oder sie sogar vor Verwitterung schütze. Vor solchen Irrtümern sei gewarnt, denn bei der Krusten- oder Schalenbildung setzt sich das Zerstörungswerk darunter in Form von Bindemittelumlagerungen selbstverständlich immer weiter fort. Es handelt sich bei solchen Krusten in der Tat zumeist nicht allein um abgelagerten Schmutz, sondern immer auch um Säureangriffe und andere chemische Prozesse: Der Kalkanteil eines weichen Sandsteines mit großem Porenvolumen und reiner Kalk- oder Glaukonitbindung wird zu Gips umgewandelt, der Eisenanteil zu Rost; Kalksteine können mit ihrer ganzen Oberfläche zu Gips karbonatisieren.

Außerdem sind auch mikrobiologische Zerfallswirkungen erkannt worden. Es handelt sich dabei um hinter den Schalen oder direkt auf dem Mauerwerk sitzende Mikroorganismen, die durch CO_2 -Abgabe und Produktion von Säuren langfristig den Stein zerstören können (Warscheid 1996; Abb. 5.9).

Abb. 5.6 Das Sandstein-Fenstergewände zeigt eine starke Abscherbelung



Abb. 5.7 Die stark abgewitterten Sandsteine im Sockel der St. Gumbertuskirche in Ansbach



5.1.3 Schäden an Backsteinmauerwerk

Bei Backsteinwänden beobachtet der Fachmann folgende hauptsächlich infolge Wassereinwirkung verursachte, typische Schäden:

Abb. 5.8 Die Bindemittel- auswaschung findet bereits nach wenigen Tagen statt, wenn das Mauerwerk nicht abgedeckt wird und Regenwasser eindringen kann



- Verschmutzung durch Schmutzpartikel. Durch kapillare Wasseraufnahme und als Folge der in mineralischen Baustoffen stets vorhandenen Schwindrisse wird bei Regen der in der Luft vorhandene Schmutz (Ruß, Gummiabrieb, Staubpartikel, etc.) vor allem in die Fugen eingeschwemmt. Die staubförmige, fettige, rußige oder ölige Ablagerung bindet Wasser in der Fuge, das bei Frost auffriert und den Fugenmörtel, aber auch die anliegenden Steinflanken zerstört.
- Verschmutzung durch Kalk- oder Salzauswaschung. Die Backsteine selbst zei- gen meist einen Grauschleier infolge „*Kalksinter*“, der aus dem Fugenmörtel ausgewaschen wurde oder auch aus schlechten Backsteinen austreten kann. Dabei werden lösliche, nicht karbonatisierte Kalkanteile als Calciumhydroxid

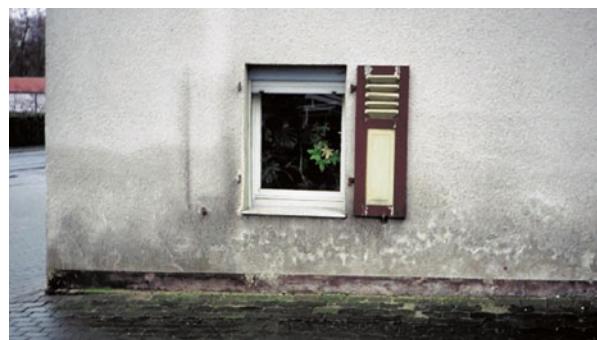


Abb. 5.9 Fulda, Schloss. 1989 wurden die Mauerflächen gereinigt, die Statuen auf den Mauern dagegen behielten ihre schwarzen Krusten

Abb. 5.10 Bewuchs des Strebewerk-Schwibbogens der St. Georgenkirche in Wismar vor der Sanierung



Abb. 5.11 Die feuchten Stellen an der Hauswand der Gaststätte zeigen sich als dunkle Flecken mit einem oberen, mäandrierenden Rand



$\text{Ca}(\text{OH})_2$ an der Oberfläche zu Kalziumkarbonat CaCO_3 umgewandelt, das als weiße Sinterschicht zu beobachten ist.

5.1.4 Allgemeine Schäden am Mauerwerk

An allen älteren Mauerwerken kann jeder Laie eine biologische Beeinträchtigung der Oberfläche sofort erkennen:

- Oberflächenbewuchs; Häufig lässt sich eine biologische Korrosion feststellen, die aus Bakterien, Algen, Flechten, Moos, Schimmelpilzen, Farnen, Gräsern, Kräutern, Sträuchern und kleinen Bäumen besteht (Abb. 5.10).

Insbesondere bei verputzten Mauerwerken beobachtet man diese Nässe schäden:

- Verfleckung der Oberfläche; Infolge der Durchfeuchtung des Putzes wird auf der äußeren Oberfläche Staub und Schmutz gebunden. Die Putzoberfläche zeigt infolgedessen dunkle Verfärbungen. Diese verfärbten Flecken weisen zumeist einen „mäandrierenden“ Rand auf (Abb. 5.11).
- Schimmelpilzbildung; Bei Durchfeuchtung des Innenputzes durch Kondensat bzw. Tauwasser an der Innenwandoberfläche wird Schmutz gebunden und damit der Nährboden für Schimmelpilze bereitet (Abb. 5.12).

Abb. 5.12 Schimmel in einer Außenwandecke



5.2 Salzschäden

Mit den Feuchteschäden gehen die Salzschäden eng einher, denn Wasser ist das Medium, in dem bauschädliche Salze gelöst und transportiert werden können. Insbesondere folgende Schadensbilder sind leicht zu beobachten:

- Anstrichabplatzungen, beginnende Ausblühungen vor allem im Haussockelbereich. Die Verdunstung eingedrungener Feuchte lässt gelöste, bauschädliche Salze aus dem Mauerwerk heraus an die Putzoberfläche wandern und führt dort durch Trocknen zu neuen Salzkristallen. Durch ihr großes Volumen und des dadurch entstehenden Kristallisierungsdrucks in den zu kleinen Porenräumen sprengen sie den oberflächennahen Porenraum der mineralischen Baustoffe. Infolgedessen wird die Oberfläche des verputzten Mauerwerks mürbe, kann keine Anstriche mehr tragen und die absandende Oberfläche wird von Wind und Wetter mitgenommen (Abb. 5.13).
- Weiße Krusten auf den Mauersteinen (im Volksmund meist als „Salpeter“ bezeichnet); Bauschädliche Salze (s. Tab. 5.1) bilden Kristalle an der Oberfläche, die als weiße Salze sichtbar werden. Es können aber auch Anteile an leicht löslichen Salzen wie Magnesium, Kalium oder Natrium sein, die infolge Zugabe von Magerungsmitteln in den Backstein gelangt sind. Sie bilden in ihrer schwefelsauerer Variante den weißen Anflug an der Backsteinoberfläche.
- Fehlende horizontale Sperrsicht gegen andringende Feuchte. Insbesondere an Kellerwänden lässt sich von innen das Vorhandensein einer horizontalen Sperr-

Abb. 5.13 Anstrich- und Putzabplatzungen im Haussockelbereich wegen auskristallisierender Salze



Tab. 5.1 Die wichtigsten bauschädlichen Salze.
(Entnommen: Weber 1988, S. 56; Arendt und Seele 1999, S. 15)

<i>Sulfate</i>	
Gips, Calciumsulfat	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Bassanit	$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$
Kieserit	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Hexahydrit	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Bittersalz, Magnesiumsulfat, Epsomit	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Glaubersalz, Natriumsulfat, Mirabilit	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
Ettringit	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$
<i>Nitrate</i>	
Magnesiumnitrat	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Calciumnitrat	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Natriumnitrat	NaNO_3
Kaliumnitrat	KNO_3
Kalksalpeter	$5\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{NH}_4\text{NO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
<i>Chloride</i>	
Calciumchlorid	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Magnesiumchlorid	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Kochsalz, Natriumchlorid	NaCl
<i>Carbonate</i>	
Soda, Natriumcarbonat, Natrit	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
Kalk, Calciumcarbonat	CaCO_3
Kalzit	CaCO_4
Pottasche, Kaliumcarbonat	K_2CO_3
Dolomit	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

schicht leicht erkennen: Bis zu einer bestimmten waagerechten Höhenlinie erstreckt sich ein dunklerer, feuchter Bereich und oberhalb davon ein hellerer, deutlich trockenerer. Dieses Erscheinungsbild erweist zudem die Wirksamkeit der vorhandenen Sperrsicht (Abb. 5.14).

Abb. 5.14 Durchfeuchtete Kellerwände infolge einer fehlenden horizontalen Sperrsicht



- Fehlende vertikale Sperrsicht. Die vertikale Sperrsicht wird sofort nach Anlegen der Sondagen als eine die Oberfläche bedeckende Schicht auf dem Außenmauerwerk erkannt. Das Mauerwerk darf nicht bloß liegen, sondern muss entweder eine schwarze, also bituminöse, oder eine graue, also zementhaltige Dämmsschicht aufweisen.
- Hygrokopische Wasserschäden. Salzhaltige Partien im Mauerwerk binden Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft. Solche dunkleren, oft auch schon angegriffenen oder zerstörten Zonen im Außenputz liegen unzusammenhängend mitten in der Wandfläche (Abb. 5.15).
- Hausgemachte, „*anthropogene*“ Feuchteschäden, verursacht durch perforierte Dachrinnen, fehlende Regenrohre, undichte Dächer, undichte Fenster, fehlerhafte Haustechnik, etc. lösen bauschädliche Salze vor allem auch im Traufbereich der Wand. Infolgedessen finden sich stark angegriffene Bereiche oben unter dem Dach, in Fensterbrüstungen oder an Hausecken (Abb. 5.16).
- Wasseraufnahme durch Kondensation. An Wärmebrücken schlägt sich Kondenswasser nieder, das bei längerem Einwirken in den oberflächennahen Zonen des Mauerwerks ebenfalls bauschädliche Salze löst und Ausblühungen bzw. mürbe Oberflächen verursacht. Besonders unerwünscht ist die damit einhergehende Schimmelpilzbildung (Abb. 5.17).

Abb. 5.15 Die Außenwände der Altstadthäuser in Erfurt zeigten 1990 viele, auch hygroskopisch verursachte Mauerwerkschäden



Abb. 5.16 Defekte Dachrinnen und Regenfallrohre erzeugen gravierende Schäden im Mauerwerk



Abb. 5.17 Schimmel in der Fußbodenecke von Boden und Wand



- Wasseraufnahme durch kapillare Kondensation. Vor Erreichen des Sättigungsdampfdruckes im Mauerwerk kommt es bereits in seinen feinsten Kapillaren zur Wasserausscheidung. Dieser Weg der Wasseraufnahme spielt vor allem im Zusammenhang mit der Ausgleichsfeuchte der einzelnen Baustoffe eine große Rolle. Wiederum löst das Wasser bauschädliche Salze, die an die Oberfläche der Kapillaren wandern, dort verdunsten und in diesem Zusammenhang neue Salzkristalle aufzubauen. Der infolge des Kristallisations- und Hydratationsdrucks entstehende Sprengdruck zerreißt die vorhandenen Porenräume der Baustoffe und zermürbt die Oberfläche des Mauerwerks (s. Kap. 4.1).

Nicht auf Anhieb zu erkennen und daher wesentlich gefährlicher sind freilich diejenigen Schäden, die nach innen, in das Mauerwerk hinein wandernde Salze verursachen. Durch beständigen Wassernachschub wird der Salzhorizont immer tiefer in den Mauerwerksquerschnitt hinein verlegt; die bei einer Trockenlegung des Mauerwerks entstehende Kristallisation der Salze kann in solchen Fällen die inneren Steinporen und damit einhergehend das gesamte Mauerwerksgefüge zerstören.

5.3 Setzungsschäden und typische Rissverläufe

Die meisten alten Wohnbauten weisen – wie bereits besprochen – nur unscheinbare, kaum tragfähige Fundamente aus mit Kalkmörtel gebundenen Steinbrocken auf. Oft stehen die Mauern direkt auf dem humosen Erdboden. Bei großen repräsentativen Gebäuden dagegen setzten die Baumeister das Mauerwerk auf Fundamente aus senkrecht eingeschlagenen Holzstämmen, auf die starke Eichenbohlenroste verlegt wurden. Die Köpfe der eingeschlagenen Holzpfähle schützte man mit einer Packung aus Ton oder Lehm vor dem Austrocknen (s. Abb. 2.58). Die Fundamente aus Eichen, Tannen- oder Fichtenstämmen blieben in der Regel über Jahrhunderte intakt, wenn sie sich nur stets im nassen Milieu befanden. Als mit dem Beginn des 20. Jahrhunderts mit der Kanalisierung der Städte und Dörfer der Grundwasserspiegel sehr erheblich abgesenkt wurde, vermulmten die Holzroste und -pfähle rasch.

Abb. 5.18 Ansbach, Marstall am Schloss. Fundament aus in den Grund eingetriebenen Stämmen



Erhebliche Setzungen der Gebäude waren die Folge. Die Setzungsrisse z. B. am Residenzschloss in Ansbach, zerbarsten das Fundament und alles aufgehende Mauerwerk. Fensterstürze und Gesimse brachen mittendurch (Maier 2005; Abb. 5.18).

Solche Grundwasserabsenkungen finden heute sogar noch verstärkt im Zuge der Altstadtsanierung statt, da in manche Altstadtkerne erst bei dieser Gelegenheit Kanäle, Wasser-, Gas-, Elektro-, Fernwärme- und andere Leitungen eingebaut werden. Diese Leitungen werden zumeist in Sand eingebettet und bilden somit eine ungewollte Dränage. Auch das Errichten von Tiefgaragen in den Altstadtbezirken bringt eine massive Störung des Grundwassers und durch eine unkontrollierte Wasserhaltung eine erhebliche Absenkung des Grundwasserspiegels mit sich, genauso wie das Abreißen und Aufbauen von einzelnen Altstadthäusern auf modernen Fundamenten zusammen mit dem Einbau von neuen Dränagen. Wenn keine geeigneten Vorbeugemaßnahmen getroffen werden können, lassen sich aufwendige Unterfangungsarbeiten kaum vermeiden, um Setzungsrisse zu verhüten.

Mauerwerk reißt, wenn sich der Baugrund unter ihm setzt. Das geschieht insbesondere dann, wenn Teile des Gebäudes auf aufgefüllten und daher aufgelockerten Bereichen sitzen. Die daraus resultierenden Risse sind in aller Regel sehr bald nach der Errichtung des Gebäudes entstanden und verbreitern sich im Laufe der ersten Jahre, kommen aber nach einer gewissen Zeit zum Stillstand. Handelt es sich jedoch z. B. um lehmigen Baugrund, so wird er durch beständiges Quellen und Schwinden auch die Rissflanken in stetiger Bewegung halten. Meistens sieht man in diesem Fall die Reste erfolgloser alter Nachbesserungsversuche an ihnen haften (Abb. 5.19).

Besonders problematisch sind Setzungen, die erst nach vollzogener Sanierung auftreten. Dies geschieht immer dann, wenn die Instandsetzungsmaßnahmen und die neue Nutzung eine erhebliche Gewichtszunahme des sanierten Gebäudes oder Gebäudeteiles mit sich gebracht haben. Diese Gefahr wird häufig auch von erfahrenen Tragwerksplanern unterschätzt. So z. B. wurden historische Gebäude einer ehemaligen Propstei für ein Schulungszentrum aufwendig saniert und in die ehemals landwirtschaftlich genutzten Räume moderne Verwaltungs- und Schulungsräume samt der erforderlichen Ausstattung eingebaut. Zwei Jahre nach Ingebrauchnahme

Abb. 5.19 Fulda, Propstei Johannesberg, Torbau. Die Fensterstürze waren infolge Setzung gebrochen. Inzwischen ist der Torbau saniert



traten klaffende Risse in den Außenwänden auf, die bis an das Dach hinauf von unten bis oben durchgingen. Die Tragwerksplanung hatte die gewaltigen zusätzlichen Lasten, die vor allem durch die nicht erwartete, hohe Frequenz an Schulungsteilnehmern verursacht wurden, nicht berücksichtigt. Diese enormen Lasten drückten nunmehr auf die alten Fundamente und damit auf den Baugrund, ohne dass sie durch entsprechende Verstärkung aufgefangen worden wären. Die nachträglich notwendig gewordenen Unterfangungsarbeiten waren ärgerlich, denn sie waren mit einem hohen Kostenaufwand verbunden.

Form, Tiefe und Rissbreite ergeben Aufschluss über die erfolgten Bewegungen und Verformungen des Mauerwerks. Setzungsrisse infolge nicht mehr tragfähiger Fundamente oder infolge nachgebenden Baugrundes verlaufen häufig schräg von unten nach oben von der Absetzstelle weg oder sie folgen der Steinverzahnung im Verband, d. h. sie zeigen einen treppenförmigen Rissverlauf. Sie gehen durch das gesamte Mauerwerk über alle Stockwerke hinweg von unten nach oben zumeist schräg hindurch. Oft suchen sie sich auch ihren Weg durch schwächere Mauerwerksbereiche wie eine nahegelegene Fensterbrüstung bzw. -sturz oder Mauer-

Abb. 5.20 Schnaittach, Kalvarienberg, Kapellenwand. Die Risse folgen der Steinverzahnung im Verband=treppenförmiger Rissverlauf



Abb. 5.21 Abriss der Haus-ecke, die auf Stahlträgern ruht, infolge thermischer Spannungen



schen. Sie sind daher für den Fachmann relativ leicht erkennbar. Für alle anderen Risse gilt: Zum mindesten zum Zeitpunkt ihres Entstehens verlaufen sie „*etwa rechtwinklig zur Zugspannungs- und parallel zur Druckspannungsrichtung*.“ (Wenzel und Kleinmanns 2000; Abb. 5.20)

5.4 Thermische Spannungen

Temperaturbedingte Längenänderungen führen ebenfalls zu Rissen. Das Volumen eines Baustoffs korreliert immer mit der jeweiligen Temperatur: verändert sich die Temperatur, dann ändert der Baustoff seine räumliche Ausdehnung. Die Wärmeausdehnungskoeffizienten der Baustoffe sind äußerst unterschiedlich. Ein Mauerwerk kann solche thermische Längenänderungen nur dann schadlos überstehen, wenn es in der Lage ist, sich ohne Einspannung frei zu bewegen. Treten jedoch im kraftschlüssigen Verbund eines Bauwerks Zwängspannungen in den Mauern auf, so können dadurch sehr starke, die Zugfestigkeit eines Mauerwerks überschreitende Kräfte entstehen. Sehr schnell klaffen dann an dieser Stelle Risse, die auch nach langer Zeit noch immer dynamisch sein können (Abb. 5.21; Tab. 5.2).

Tab. 5.2 Wärmeausdehnungskoeffizient α einiger Baustoffe bei 20 °C

Bezeichnung	α in 10^{-6} K^{-1}
Beton	6–14
Blei	29,3
Eis (bei 0 °C)	51,0
Eisen	12,2
Glas (Fensterglas)	7,6
Holz, Eiche	8,0
Kupfer	16,5
Mauerwerk	5,0
Polystyrol	ca. 70
Stahl (ferritisch)	11–15

Abb. 5.22 Schwindrisse im Wärmedämmunterputz



5.5 Schwindverhalten

Alle mineralischen Baustoffe schwinden. Während des Abbinde- bzw. Trocknungs- vorgangs von frischem Mauerwerk bleiben Schwindrisse nicht aus. Deshalb sind dicke Mörtelfugen im Mauerwerksverband stets zu vermeiden. Bei historischem Mauerwerk ist dieser Vorgang selbstverständlich längst abgeschlossen. Gleichwohl kann es beispielsweise nach einer erfolgreichen Trockenlegungsmaßnahme zu erheblichen Schwindrissen kommen, wenn solches Mauerwerk bislang beständig im feuchten Milieu stand und nun zügig austrocknet. Das Schwindverhalten des Mauerwerks führt nicht nur zu Rissen in ihm selbst, sondern macht sich besonders unangenehm durch Risse im darüber gezogenen Verputz bemerkbar (Abb. 5.22).

Besonders breite Schwindrisse treten an denjenigen Fugen auf, an denen Mauerwerke unverzahnt aneinanderstoßen. Abtrocknende Gewölbe z. B. eines bislang stets nass gewesenen, nunmehr aber als rustikaler Kneipraum genutzten Keller- raums schwinden oft so sehr, dass sie sogar vom Einsturz bedroht sind.

Abb. 5.23 Ansbach, St.Gumbertus-Kirche, Westtürme. Die aus der Not geborene dreitürmige Westfassade von Gideon Bacher ist heute ein Wahrzeichen der Stadt



5.6 Deformationen infolge externer Kräfte

Ungleichmäßige Setzungen können sich auch durch Schiefstellung des Mauerwerks bemerkbar machen. Bekanntestes Beispiel dafür ist der „*Schiefe Turm*“, der Campanile der Kathedrale von Pisa (s. Abb. 2.57). Solches Verdrücken aus der Senkrechten entsteht natürlich auch durch seitlichen Schub, der von seitlich anstehendem oder angefülltem Erdreich ausgehen kann. Zumeist sind es jedoch die anderen Bauglieder in dem Gebäude, die auf das aufgehende Mauerwerk schiebend wirken: vor allem Gewölbe, Decken und Dachstühle. Beispielsweise an der gotischen Kirche der Zisterzienser in Ebrach hatten sich die Schildwände der Langhausgewölbe um etwa 10 cm von den Gewölbekappen gelöst oder am Marstallgebäude des Residenzschlosses in Ansbach wurden die Außenwände um mehrere Zentimeter durch den Schub der alten Stallgewölbe ausgebaucht. Solche Schübe entstehen häufig dann, wenn frühere, unsachgemäße Reparaturen das Tragverhalten jener Bauglieder beeinträchtigt haben. Es gibt aber auch gewollte und daher zu erhaltende Schiefstellungen an historischen Mauerwerken, etwa an Stützmauern oder an Kirchenwänden (Maier 1994).

Die alten Baumeister konnten freilich auch nicht immer die auf ihr Mauerwerk einwirkenden Kräfte richtig einschätzen und so kann historisches Mauerwerk infolge einer schlechten Ausführung oder Fundamentierung bereits bei seiner Errichtung geschädigt sein. Andreas Schlüter, der berühmte Baumeister des barocken Berliner Stadtschlosses, hat z. B. den sog. „*Münzturm*“, einen aus dem Mittelalter stammenden Turm an jenem Schloss, erhöhen sollen. Dies misslang ihm so vollständig, dass der ca. 90 m hohe Turm 1702 trotz aller in größter Eile angestellten Unterfangungsarbeiten schließlich infolge des nachgebenden Baugrundes sich immer mehr neigte und schließlich wegen Grundbruch gänzlich umfiel, was Andreas Schlüter sofort seine Stellung als königlicher Baumeister kostete (Peschken und Klünner 1991). Ebenso stürzte einer der beiden romanischen Türme des Westwerks der St. Gumbertuskirche in Ansbach um, als der aus Ulm berufene, als erfahren geltende Baumeister Gideon Bacher 1597 das Westwerk im Sinne der Renaissance neu gestalten sollte (Maier 1986). Er wurde nicht entlassen, sondern musste neue Türme errichten, die er aber wegen der Labilität des Baugrundes nunmehr zu einer Drei-

turmgruppe zusammenband, eine sehr individuelle und unkonventionelle Lösung, die schließlich zum Wahrzeichen der Stadt Ansbach avancierte (Abb. 5.23).

5.7 Fachwerk

5.7.1 Schäden an Fachwerkwänden

Die selbstverständliche Vertrautheit im Umgang mit dem Fachwerk – auch bei Laien – verlor sich im Laufe des 19. Jahrhunderts. Seitdem mehren sich die unsachgemäßen Eingriffe. Im Zuge der massenhaften Sanierung von Fachwerkgebäuden vor allem in den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts haben Fachleute und Laien nicht zuletzt durch den wahllosen oder falschen Einbau von für den modernen Neubau entwickelten Baustoffen eine gewaltige Fachwerkzerstörung eingeleitet.

5.7.1.1 Wandsockel

Fachwerkwände stehen in aller Regel auf Steinsockeln. Sie wurden je nach dem anstehenden Naturgestein aus Sand-, Kalk-, Granit-, Basalt- und anderen Natursteinen aufgemauert. Seit dem 17. Jahrhundert kommen sehr häufig zumeist verputzte Backsteinsockel vor.

Die größte Schwachstelle am Sockel ist die stets vorhandene Durchfeuchtung. Um die Feuchtigkeit zu mindern, sind daher manchmal die Sockelmauern statt mit Mörtel mit Lehm gefügt. Die Schwellen der Fachwerkwände liegen auf dem Sockel, dessen Feuchte überträgt sich auf sie und sie werden ebenfalls durchfeuchtet. Die Schwelle vermulmt teilweise oder ganz. Dieser Schaden ist sehr häufig zu beobachten, bei den meisten Fachwerkhäusern muss daher zuerst die Schwelle instandgesetzt werden. Dazu genügt es meistens, unter die auf dem Sockel liegenden, gesunden Schwellen einen Streifen aus Bitumenpappe zu schieben, um so die trockene Schwelle vom feuchten Sockel zu trennen. Fachwerkschwellen können jedoch infolge der Sockeldurchfeuchtung auch völlig vermulmt sein. Sie müssen dann ausgetauscht werden. Der Zimmerer legt selbstverständlich unter die neue Schwelle eine geeignete Baufolie oder Pappe, damit der Feuchtetransport vom Sockel in die neue Schwelle unterbunden wird (Abb. 5.24).

Die Feuchtigkeit allein bewirkt aber nicht den einzigen Bauschaden, meistens kommt noch die mit ihr einhergehende Einlagerung bauschädlicher Salze dazu. Die Versalzung der Fachwerksockel ist zunächst einmal historisch bedingt: Schon immer war Kleinviehhaltung auch in Stadthäusern üblich. Der Hof wurde als Pferdestall genutzt. Auf der Straßenseite lagen die Misthaufen – auch in der Stadt – dicht an den Häusern. Tierische und menschliche Fäkalien mit ihren bauschädlichen Salzen wurden oft jahrhundertelang in den Sockel eingelagert. Heutzutage wird das winterliche Streusalz durch Schneeschieben in den Altstadtstraßen dicht an den Fachwerksockel herangebracht. Bei Tauwetter saugt die Sockeloberfläche die entstehende Salzlake begierig auf. Zudem werden bauschädliche Salze im Sockelmauerwerk gelöst, der Sockel verliert seine Standfestigkeit.

Abb. 5.24 Fachwerkhaus mit total zerstörtem Sockel



Eine weitere, sehr häufige Schadensquelle am Sockel entsteht durch defekte oder fehlende Regenfallrohre. Sie münden oftmals offen auf dem Baugrund oder auf dem Straßenpflaster am Haus dicht neben dem Sockel. Mitunter wäre sogar ein Kanalanschluss vorhanden, doch die Rohre sind nicht angeschlossen oder schlicht und einfach kaputt. Infolgedessen steht das Gebäude oft tagelang im Wasser und die Sockelmauern durchnässen völlig. Der Kalk des Mauermörtels wird ausgewaschen, die Mauersteine des Sockels verlieren ihre Bindung zueinander und bröckeln heraus. Schließlich verliert der Sockel seine Standfestigkeit.

5.7.1.2 Ausfachungen, Gefache

Die Vermulmung des Fachwerkholzes röhrt oftmals von Schäden am Gefach her. In die Außenwandfugen zwischen Holz und Gefach kann infolge Schlagregens leicht Regenwasser eindringen. Um diesen Vorgang einzudämmen, schließt man die Fuge mit Gefachputz. Freilich lassen sich solche Fugen nicht dauerhaft schließen, es wird stets eine Restfuge bleiben. Wenn das Gefach so konstruiert ist, dass Wasserdampf hindurch diffundieren kann, wird auch das durch die Fuge eingedrungene Wasser auf diesem Wege wieder austrocknen. Schlimm wäre es, wenn sowohl das Gefach als auch die Fuge wasserdampfundurchlässig abgedichtet würden. Das Wasser würde vom Holz aufgesogen werden und der Vermulmungsprozess würde rasch forschreiten. Es ist nämlich ein weit verbreiteter Trugschluss, dass man eine Fuge

Abb. 5.25 Mit Natursteinen ausgemauertes Gefach



Abb. 5.26 Ausspänen der Fugen zwischen dem Mauerwerk und einer Bohlenbalkendecke



zwischen Gefachfüllung und Holzbalken wasserdicht mit so genannten „*dauerelastischen Materialien*“ verschließen können. Durch das Schwinden und Quellen des Holzes bedingt, reißt hier jedes Material auf und lässt Regenwasser ein. Die dennoch verbleibende relative Dichtigkeit von Anstrich und Fugenmasse hindert das eingedrungene Wasser am Austrocknen und führt dann zu gravierenden Schäden (Abb. 5.25).

Risse zwischen Mauerwerk und aufliegendem Holz der Decke darf man ebenfalls nicht abdichten. Kleinere Risse sind nämlich unbedenklich, größere muss man ausspänen (Abb. 5.26).

In der Gefachkonstruktion dürfen keine Hohlräume sein oder sich bilden. Das eindringende Wasser sammelt sich nämlich in ihnen. An solchen Stellen faul das Holz. Außerdem bildet es einen guten Nährboden für tierische und pflanzliche Schädlinge. Solche Faulvorgänge zerstören vor allem in senkrechten Ständern mitunter auch den Kernholzbereich. Der Ständerfuß zumal saugt geradezu das Wasser

Abb. 5.27 Kissenförmig vorstehender Gefachputz



aus der durchfeuchtenen Schwelle unter ihm. Ständer und Sparrenfüße sind deshalb fast regelmäßig zerstört.

Strohlehm auf Stakung besitzt als Gefachverschluss durchaus gute Eigenschaften. Seine Wärmedämmung ist freilich nur relativ gut (s. Tab. 3.6), seine Schallschutzeigenschaft ebenfalls. Dringt Tauwasser in den Strohlehm ein, kann er dies durch Quellen speichern, bis es wieder verdunstet. Regen dagegen wäscht den Lehm aus. Wenn die schützende Putzschicht fehlt, zeigt er sich als nicht wasserbeständig. Bleibt der Lehm im Gefach nass und kann im Winter nicht austrocknen, so friert er auf und sein Gefüge wird zermürbt. Hier zeigt er sich anfälliger als andere Verschlussmaterialien.

Eine weitere Schwachstelle stellt der Gefachputz dar, wenn er zu hart ausgebildet wird. Besonders gut haben sich Trasskalkputze auf Gefachen bewährt. Bei Lehmgefachen kommt es entscheidend auf den Putzträger und seine richtige Befestigung auf dem Lehmgefach und nicht etwa auf dem Fachwerkholz an. Die durch das Schwinden und Quellen des Holzes entstehenden Bewegungen kann der Putzträger nämlich nicht kompensieren. Im Lehm befestigtes Rippenstreckmetall hat sich als Putzträger gut bewährt.

Der Gefachputz muss auf jeden Fall bündig mit dem Fachwerkholz an der Fassade sein. Steht er an der Fuge waagerecht vor das Holz vor, bildet er einen zusätzlichen Wasserfang für ablaufendes Fassadenwasser und führt dieses über die bereits genannte, unvermeidliche Fuge in das Wandinnere. Der Putz im Gefach kann also höchstens kissenförmig vor ein Gefach ausbauchen, muss aber auch dann bündig an das Holz anschließen (Abb. 5.27).

Wer erfolgreich historisches Mauerwerk sanieren will, darf allerdings beim bloßen Erkennen von Schäden nicht stehen bleiben, sondern muss zunächst den Bestand gründlich kennenlernen, um die Ursachen für die Schäden analysieren zu können. Die dafür dienlichen Untersuchungsmethoden und Bestandsaufnahmeverfahren umfassen mittlerweile einen sehr umfangreichen Katalog an Maßnahmen, die bezogen auf die vorhandene Mauerwerkssubstanz sich als zerstörungsfrei, zerstörungsarm oder zerstörungsintensiv klassifizieren lassen. Sie alle werden unter dem Oberbegriff „Mauerwerksdiagnostik“ zusammengefasst (WTA-Merkblatt 1999).

Die einzelnen Arbeitsschritte zur Erstellung einer Mauerwerksdiagnose lassen sich in einem schematischen Überblick zusammenstellen: (s. Tab. 6.1; Maier 2010)

6.1 Orientierende Objektbesichtigung

Jede Mauerwerksdiagnose beginnt mit einer orientierenden Bauwerksbesichtigung, um den voraussichtlichen Untersuchungsumfang und -aufwand in Abhängigkeit von Anlass und den baulichen Gegebenheiten festzulegen. Daraus abgeleitet können schließlich die Untersuchungskosten und die Dauerhaftigkeit der Sanierung abgeschätzt werden.

Als Ergebnis dieser ersten Besichtigung sollten folgende Feststellungen getroffen werden:

- Allgemeine Beschreibung der Gebäudesituation; Topographie, Bebauung der Umgebung, Siedlungszusammenhang, Erschließung des Gebäudes, Grundwasserstand, allgemeiner Bautyp, angrenzende Baukörper, Himmelsrichtung, schattenspendende Bäume, das Dach in seiner äußeren Erscheinung, Dachstuhlkonstruktion, Belichtung, allgemeine Feststellung zur Mauerwerksart, Fundamentierung, etc.
- Umgebungsflächen, ihre Konstruktion und ihr Wasserverhalten.
- Herstellen von verbindlichen Orientierungssystemen; (Schmidt 1989) Solche müssen von Anfang an sicher stellen, dass die stereometrische Position jedes Teils am Mauerwerk exakt bestimmt wird. Manchmal muss im Verlauf der Instandsetzungsarbeiten jeder einzelne Werkstein durchnummieriert werden. Das

Tab. 6.1 Organogramm*Orientierende Bauwerksbesichtigung*

Allgemeine Beschreibung der Gebäudesituation

Umgebungsflächen

Historische Baukonstruktion

Orientierungssysteme

Dokumentationsformen

Systematik der Baubeschreibung

Erforderliche Sicherungsmaßnahmen

Abschätzen des Diagnoseaufwands

Voraussichtliche Untersuchungskosten

Abschätzen der voraussichtlichen Dauerhaftigkeit der Sanierungsmaßnahme

Anamnese *Schadensaufnahme*

Archivalien Typische Schäden am Altbau

Bauunterlagen Inaugenscheinnahme

Alte Abbildungen und Fotos Skizzenhafte und fotografische Erfassung

Nutzungsgeschichte Einfache Untersuchungen

Beurteilung der Erkenntnisse

Entscheidung über das weitere zielgerichtete Vorgehen

Auswahl der Untersuchungen

Beauftragung der Sonderfachleute

Überprüfung des Kostenvoranschlags

Planunterlagen *Probenahme*

Handaufmaß Für Untersuchungen mit geringem Substanzverlust

Verformungsgerechtes Aufmaß Untersuchungen im Labor

Fotogrammetrie Restauratorische Untersuchungen

Weitergehende Untersuchungen mit größerem Substanzverlust

Sondagen

Deckenschnitte

Freilegen von Knotenpunkten

Baustoffe *Tragverhalten* *Feuchte*

Art und Verteilung Baugrund Materialfeuchte

Zusammensetzung Fundament Maximales Wasseraufnahmevermögen

Baustoffkennwerte Mauerwerk Salzgehalt

Gewölbe Klimamessung

Balkendecken

Dachstuhl

Schalldämmung *Brandschutz* *Wärmedämmung*

Vorhand. Trittschalldämmung Rettungswege U-Wert-Ermittlung

Vorhand. Luftschalldämmung Landesbauordnung Außendämmung, Innendämmung

Verbesserungsmaßnahmen *Blitzschutz* Taupunktermittlung mit hygrothermischer Simulation, Wärmebrücken*Bewertung der Untersuchungsergebnisse**Instandsetzungsplanung*

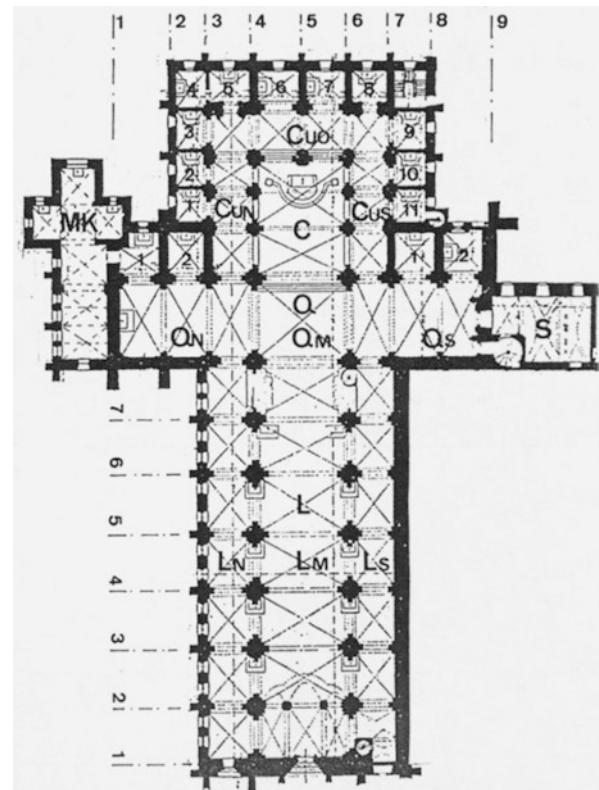
Planung von Art und Umfang der Instandsetzungsschritte

Planung der Technologie

Planung der Materialien

Aufgrund der Vorgaben zu Funktion und künftiger Nutzung

Abb. 6.1 Ebrach, Gotische Pfarrkirche. Orientierungssystem im Grundriss. Zeichenerklärung: Die äußereren Zahlen sind Jochnummern. *Q* Querhaus, *QS/QM/QN* südliches, mittleres, nördliches Querhaus; *C* Chor, *CU* Chorumgang, *L* Langhaus, *MK* Michaelskapelle, *S* Sakristei. Die den Chor umfassenden Kapellen sind nur mit einfachen Nummern gekennzeichnet



gesamte Gebäude mit allen seinen Teilen wird durch ein Raum für Raum fortlaufendes Nummernsystem erfasst.

Erst werden die Räume durchnummeriert, dann die Wände, Fenster und Türen jeweils im Uhrzeigersinn. Das einmal festgelegte Orientierungssystem muss allen folgenden Arbeitsschritten wie Ausschreibung, Detailplänen, etc. zugrunde gelegt werden und für alle am Objekt tätigen Handwerker bis zur Abrechnung und Mängelverfolgung verbindlich bleiben. Das Orientierungssystem wird im Zuge der Sanierung entsprechend verfeinert und empfiehlt sich auch dann, wenn das Mauerwerk nicht unter Denkmalschutz steht (Abb. 6.1).

- Einleiten von erforderlichen Sicherungsmaßnahmen; Oft trifft man das Mauerwerk in einem verwahrlosten Gebäude an. Es können Abstützung oder Unterfangung gerissener Gewölbe, gebrochener Stürze und Balken erforderlich werden (Abb. 6.2).

Zumeist muss das Mauerwerk zu allererst von Gerümpel oder wildem Bewuchs befreit werden, um Schaden von Personen, die das Gebäude betreten, abzuwehren. Auch der Gutachter muss sich schützen! Lose liegende Dachziegel oder geborstene Fensterscheiben stellen für Passanten oder spielende Kinder eine erhebliche Verletzungsgefahr dar! (Abb. 6.3)

Abb. 6.2 Ronneburg, Kapellenerker. Das nicht mehr standsichere Gewölbe des Erkers musste mit Balken abgestützt und damit gesichert werden



Abb. 6.3 Ein nur ungenügend gesichertes Haus in Erfurt im Jahr 1990



- Festlegen der Dokumentationsformen;
Es muss entschieden werden, ob einfache Skizzen, ein Handaufmaß des Architekten, Beschreibungen und Fotos genügen oder ob aufwendigere Dokumentationsformen wie ein verformungsgetreues Aufmaß oder eine fotogrammetrische Vermessung hergestellt werden müssen; Festlegen der Genauigkeitsklasse des Aufmaßes. Erarbeiten von Erfassungsbögen oder eines Raumbuches (Schmidt 1989).

Abb. 6.4 Erlangen, Orange-
rie, Das Traufgesims wurde
durch den Deckenschub
abgerissen



- Systematik der Baubeschreibung:

Generelle Bestimmungen als Ausgangspunkt der Untersuchung, z. B. Definition der angewandten Fachausdrücke. Der rezente Zustand des Mauerwerks muss als Resultat eines Bau-, Nutzungs- und Zerstörungsprozesses begriffen werden, die „*sedimentierte*“ Geschichte als horizontale und vertikale Stratigraphie;

Das rezente Raumgefüge, der Grundriss, die Geschosse und Stockwerke, und vor allem das Übereinander von Mauern müssen erfasst, der architektonische Aufbau der Außenwände untersucht werden.

Genauer sind zu beobachten:

- die konstruktiven Bestandteile der Innen- und Außenwände bzw. Mauern, Brandwände, Baufugen, Übergänge von Mauerwerksteilen, überlappende Verputze, Ausflickungen, etc., soweit sie sich anhand von bereits vorhandenen Fehlstellen oder klaffenden Rissen feststellen lassen;
- konstruktive Verbindung mit anderen Bauteilen wie Mauern, Holzbalkendecken und Gewölben;
- Aufspüren von nachträglich verschlossenen Öffnungen anhand von wechselnden Putzoberflächen bzw. -strukturen oder Rissebildern;
- die Konstruktion der Dachwerke und -stühle, Feststellen der von ihnen ausgehenden Schübe anhand typischer Rissebilder in dem sie tragendem Mauerwerk; (Abb. 6.4)
- Ver- und Entsorgung des Bauwerks, insbesondere vorhandene Sicker- und Abortgruben, Abwasserdohle (=historische Abwasserleitungen), Abortanlagen, Brunnen, historische Wasserleitungen, aber auch neuere Regenrinnen, Fallrohre und ihre Anschlüsse an die Kanalisation;
- Oberflächenbehandlung des Mauerwerks;
- gestalterische Elemente der Wandflächen wie Farbfassungen, Marmormaleien, besondere Kacheln, Fliesenbeläge, hölzerne Wandverkleidungen, Lamine, Seidentapeten, Stuckmarmor, Natur- bzw. Werksteinverkleidungen;

- historische Nutzungsspuren, z. B. Nutzung des Gebäudes als Stall oder als Lager für Düngemittel oder Salze;
- offensichtliche Bauschäden;
- Abschätzen des voraussichtlichen Diagnoseaufwands.
- Abschätzen der voraussichtlichen Untersuchungskosten.
- Abschätzen der voraussichtlichen Dauerhaftigkeit der Instandsetzungsmaßnahme.

Bei der orientierenden Objektbegehung bedient sich der Gutachter in der Hauptsa-
che seiner eigenen Organe; es handelt sich um die sinnliche Erfassung durch Sehen,
Fühlen, Riechen, Hören und Schmecken. Sie vermittelt die ersten, grundlegenden
Kenntnisse über Art und Umfang der Schäden am Mauerwerk. Die meisten Beob-
achtungen können visuell gemacht werden, denn sie fallen dem genau hinsehendem
Auge auf. Oberflächenzustände wie glatt, rau, brüchig, abmehlend, etc. können sen-
sativ mit den Fingern festgestellt werden. Die Nase des Gutachters riecht muffige,
modrige oder stickige Raumluft als Folge langanstehender Feuchte. Ob der Klang
der Steine beim Anklopfen mit dem Knöchel eines Fingers hell oder dunkel ist, lässt
sich auditiv erfassen und schließlich kann die Zunge eine vorhandene Salzbelastung
schmecken.

Werkzeuge des Gutachters bei der ersten Objektbegehung

- eine starke Taschenlampe, da in alten Gebäuden zumeist kein elektrisches
Licht mehr vorhanden ist,
- einen Zimmermannshammer zu Klangproben und ersten Untersuchungen
am Putz- oder Mauermörtel,
- Schaufel und Handbesen, um verdreckte Flächen freilegen zu können,
- Senkel, Lot und Wasserwaage zur Überprüfung von Schieflagen oder Aus-
bauchungen am Mauerwerk,
- Zollstock oder Maßstab, um das Ausmaß der jeweiligen Schädigung erfas-
sen zu können,
- Kompass für die Feststellung der Himmelsrichtung,
- eine transportable Leiter, um auch höher gelegene Schadenszonen betrach-
ten zu können,
- einen Skizzenblock bzw. eine tragbare Zeichenplatte für erste zeichneri-
sche Dokumentationen.
- eine Kamera (Digitalkamera), mit der sich diese ersten Beobachtungen
und Feststellungen im Bilde festhalten lassen,
- ein Diktiergerät, um Schadensbilder ausreichend zu beschreiben.

Das Resultat der orientierenden Objektbegehung ist eine erste vorsichtige Schät-
zung des Schadensumfangs, des Diagnoseaufwands und der voraussichtlichen
Untersuchungskosten. Die Kosten der erforderlichen Untersuchungsmaßnahmen
sollten in jedem Gutachterbüro infolge eigener Ermittlungen vorliegen, Anfänger
können sich der Kostenangaben in der Literatur bedienen.

6.2 Anamnese

Sie ist die Summe aller Erkenntnisse zur Vorgeschichte des Bauwerks, in dem das in Frage stehende Mauerwerk eingebaut ist. Die Anamnese klärt zunächst die Bedingungen seiner Errichtung, dann die Art, das Ausmaß und den Zeitpunkt der Änderungen oder Reparaturen, also möglichst alle historischen Eingriffe in die Baukonstruktion und in das Gefüge des Mauerwerks. Dann beschreibt sie die Aufeinanderfolge von Ein- und Umbauten mit allen wichtigen Baufugen, soweit sich all das aktenmäßig erfassen lässt. Als wünschbares Ergebnis liegt schließlich die gesamte Sanierungsgeschichte des Gebäudes bzw. des Mauerwerks vor. Schließlich ist es unerlässlich, aus den Akten den baulich-konstruktiven Kontext des gesamten Bauwerks zu erfahren. Ziel der Anamnese muss es sein, die Schwachstellen des Gebäudes herauszufinden, um den Einsatz von bauchemischen, bauphysikalischen und restauratorischen Untersuchungen problembezogen zu steuern. Mit Kenntnis der Vorgeschichte werden Art und Umfang solcher meist mit Zerstörung oder Veränderung verbundene Untersuchungen minimiert und die Kosten für die gesamte Voruntersuchung reduziert.

Anamnese bündelt die Erkenntnisse zur Vorgeschichte des Gebäudes aus

- Archiven wie Hauptstaats- und Staatsarchiven, Diözesanarchiven, Landeskirchlichen und Pfarrarchiven, Stadt- und Kreisarchiven, Heimatvereins-, Privat- und Zeitungsarchiven, ferner Plänsammlungen der Technischen Universitäten und Hochschulen, der Kunsthochschulen; Bildarchiven wie städtische Bildarchive, Kreisbildstellen, Bildarchiv Foto-Marburg, und viele andere; (Abb. 6.5)
- Bauunterlagen, wie sie städtische Registraturen und die der Kreisverwaltungsbehörden aufbewahren, ferner sich im Privatbesitz befinden können;
- altem Bildmaterial in Zeitungsarchiven, auf Postkarten oder im Privatbesitz;
- Sekundärliteratur wie wissenschaftliche Monographien und Aufsätze, bei Bau- und Denkmälern vor allem das Dehio-Handbuch, die Denkmalbände und Denkmallisten der Landesdenkmalämter sowie Heimatbücher. Die Angaben in letzteren müssen im Hinblick auf ihre Korrektheit besonders vorsichtig gehandhabt werden.
- der rezenten Nutzungsgeschichte, die sich durch Befragen von älteren Bewohnern bzw. Nachbarn oder örtlichen Vereinen erfahren lässt.

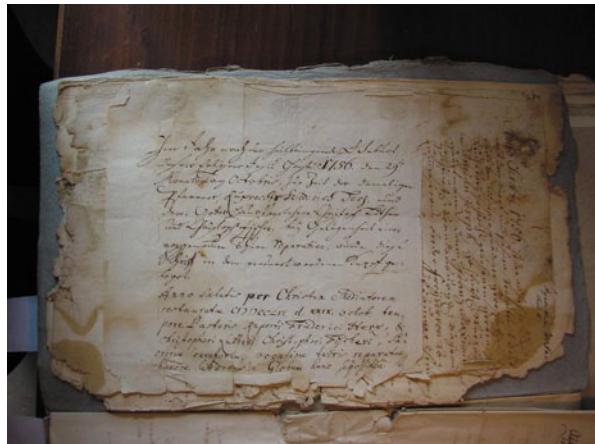
Grundsätzlich sollte sich der Untersuchende niemals durch die Behauptung, der archivalische Bestand sei längst untergegangen, von einer gründlichen Recherche abhalten lassen. In den meisten Fällen hat der Verfasser bei seinen eigenen Forschungen zur Anamnese eines Bauwerks festgestellt, dass die Akten durchaus vorhanden, aber schrecklich vernachlässigt worden sind (Abb. 6.6).

In fast allen Archiven benötigt der Untersuchende eine Vollmacht des Eigentümers, die er bei Untersuchungsbeginn im Archiv vorlegen muss. Benutzungstermine sollten mit dem zuständigen Archivar vereinbart werden. Außerdem kostet die Benutzung von Archiven Gebühren und dort bestellte Kopien von Akten oder Bildern bzw. Architekturzeichnungen sind zumeist ziemlich teuer. Ihre Bezahlung muss mit dem Auftraggeber zuvor abgesprochen sein.

Abb. 6.5 Würzburg, Bischöfliches Archiv. In modernen Magazinen bewahren Archive wichtige Quellen zu Bau und Umbau von Gebäuden auf



Abb. 6.6 Evangelisches Pfarrarchiv Weisendorf/Mfr., Turmknöpfkunde 1756. Stark beschädigte Urkunde, die über die Reparatur des Kirchturms genaue Auskunft gibt



Der Untersuchende sollte selbstverständlich über archivalische Grundkenntnisse verfügen und wenigstens die verschiedenen mit der Hand geschriebenen Kanzleischriften des 17. bis 19. Jahrhunderts, die sogenannte „*Deutsche Kurrente*“ (Beck und Henning 1994), einigermaßen lesen können, denn die Schreibmaschine wurde in der Bauverwaltung in Deutschland erst mit Beginn des 20. Jahrhunderts eingeführt und am Ende des Jahrhunderts vom Computer abgelöst.

6.3 Schadensdokumentation

Durch Inaugenscheinnahme sind die gröbsten Schäden leicht festzustellen und zu beschreiben. Danach müssen sie fotografiert werden. Die fotografische Erfassung kann sich zwar zunächst auf Einzelbilder der festgestellten Bauschäden beschrän-

Abb. 6.7 Vermulmter Eckständer zusammen mit einem Zollstock fotografiert



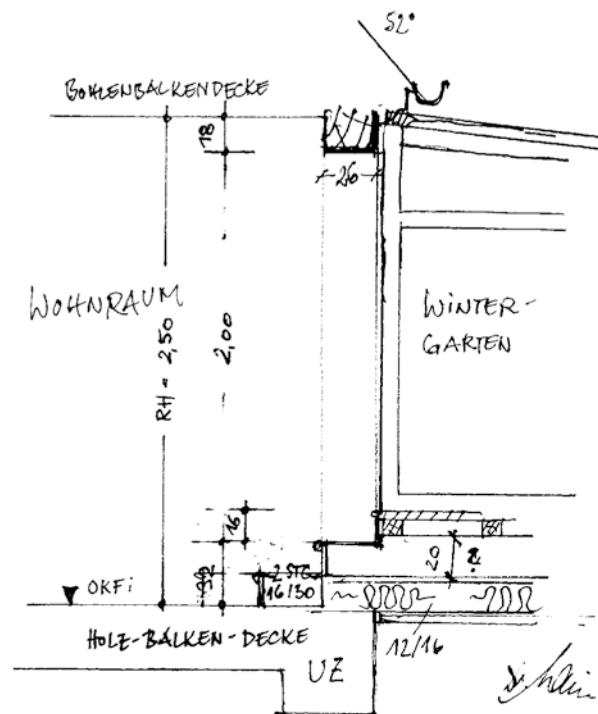
ken, grundsätzlich ist aber zu überlegen, ob nicht eine sehr genaue Bestandsaufnahme eines geschädigten Mauerwerkes durch überlappendes Fotografieren sinnvoller wäre. Eine Sofortbildkamera oder ein Foto mit dem Mobiltelefon genügt freilich nicht, um die Schäden im Bestand angemessen zu dokumentieren; hier müssen schon lichtstarke, digitale Spiegelreflexkameras auf einem justierbaren Stativ zum Einsatz kommen. Dabei soll vom selben, in einem Grundriss exakt markierten Standort aus der alte und später nach der Instandsetzung der jeweils neue Zustand fotografiert werden. Die fotografische Erfassung verlangt jedoch stets ein hohes fotografisches Können und daher oftmals den Einsatz von Berufsfotografen.

Die Größe der Fotografien sollte das Maß von 13/18 cm nicht unterschreiten. Nur auf solchen oder noch größeren Fotoformaten sind Details zu erkennen. Für die spätere Verwertung der Fotos ist es erforderlich, gemäß dem Orientierungssystem festgelegte Raumdaten im jeweiligen Bild festzuhalten. Grundsätzlich sollte auf Fotos ein Vergleichsmaßstab dargestellt sein, um die Größe des Bauteils abschätzen zu können (Abb. 6.7).

Dort, wo es auf die Farbe ankommt, fotografiert man Farbmusterkarten desselben Farbtöns mit. Wenn später die Fotos vergilben und der Farbwert sich dadurch ändert, kann über die Nummer der Farbmusterkarte der Farbwert dennoch exakt bestimmt werden. In der Regel genügen jedoch für Beobachtungen am Mauerwerk Schwarz-Weiß-Aufnahmen.

Die skizzenhafte Erfassung der angetroffenen baulichen Zustände lässt zugleich deren Bemaßung zu. Bei einfacheren Bauten tut es oft ein Handaufmaß. Gegenüber aufwendigem Geräteeinsatz hat dieses einfache Verfahren noch den Vorteil, dass der skizzierende Architekt zugleich mit der Maßhaltigkeit auch das Material und den baulichen Zustand des gemessenen und gezeichneten Bauteils erfassen kann. Das Handaufmaß ist also in jedem Falle ein „*analytisches*“ Messverfahren und ergänzt die sinnliche Erfassung (Abb. 6.8).

Abb. 6.8 Aufmaßskizze:
Stufen vom Wohnzimmer
zum Wintergarten



Die erkannten Schadensbilder müssen sorgfältig dokumentiert werden. Zur Klassifizierung von Steinschäden wurden in den letzten zwanzig Jahren Systeme entwickelt, die anhand der Erscheinungsformen Verwitterungsphänomene des Mauerwerks in Gruppen einstufen lassen.

An der RWTH Aachen wurde seit 1990 zur präzisen Klassifikation der Verwitterungsformen des Natursteins in einem Mauerwerk ein praktikables System entwickelt (Fitzner et al. 1997) und im Rahmen des Forschungsprogramms „Steinerfall-Steinkonservierung“ an mehreren historischen Mauerwerken im In- und Ausland erprobt (Snethlage 1993). Die Einstufung der Schäden wird dabei in drei Stufen präzisiert: In der ersten Stufe werden die wichtigsten Verwitterungszustände in vier Ebenen erfasst, in der nächsten Stufe werden die beobachteten Schäden den 29 hauptsächlichsten Verwitterungerscheinungen und in der dritten Ebene insgesamt sechzig individuellen Verwitterungsformen zugeordnet. In der vierten Stufe werden die individuellen Verwitterungsphänomene jedes einzelnen Werksteins schließlich ihrer Intensität gemäß unterschieden. Dieses System ermöglicht die exakte Zustandskartierung jedes einzelnen Steines in einer Natursteinwand. Eine derart aufwendige Schadenserfassung ist freilich nur an besonders hochwertigen, zumeist denkmalgeschützten Mauerwerken erforderlich (Abb. 6.9).

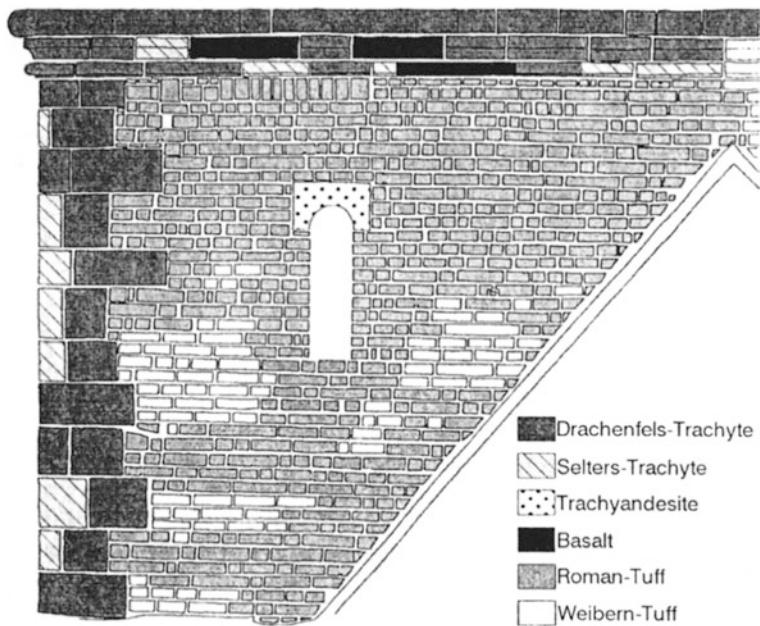


Abb. 6.9 System RWTH Aachen: Erfassung der Natursteine am Westturm von St. Quirin in Neuss

Abb. 6.10 Schadensfall nach MDDS: Abblättern salzgeschädigter Backsteinoberflächen



Im Jahre 1995 stellten holländische Forscher das MDDS (Masonry Damage Diagnostic System) vor (Van Hees und Naldini 1995). Mit Hilfe dieses Expertensystems ist es möglich, Schäden an allen Tragwerken aus Ziegelmauerwerk auszuwerten. Das System berücksichtigt elf verschiedene Zerstörungsprozesse: Frost, Salzkristallisation, umweltverursachte chemische Verschmutzung, Oberflächenerosion, Eindringen von Wasser, mechanischer Zerstörungsprozess, Oberflächenablagerung ohne chemischen Prozess, Kondensation, Strukturzerstörung, Rostsprengungen, biologisch bedingte Zerstörung (Abb. 6.10).

6.4 Untersuchungen ohne wesentliche Eingriffe in die Gebäudesubstanz

Zunächst wird die Orientierung des Mauerwerks zu den Himmelsrichtungen festgestellt. Dies gibt Aufschluss über die sonnige und die Wetterseite. Dazu benötigt man einen Kompass. Der Bearbeiter trägt die festgestellten Himmelsrichtungen in seine Lagepläne oder Grundrisskizze ein.

Als nächstes werden offensichtliche Verwitterungs-, Erosions-, Korrosions- und Biokorrosionserscheinungen zur Kenntnis genommen und fotografiert. Leicht lassen sich Substanzverluste infolge Krustenbildung, Abblättern, Schalenbildung, Absanden, Abspülungen und Hohlstellen erkennen. Um sicher zu gehen, klopft man zunächst mit dem Knöchel der eigenen Hand und dann vorsichtig mit dem Hammer auf die beschädigte oder wahrscheinlich hohl liegende Stelle. Mit dem Zollstock erfassst man das Ausmaß der flächenhaften Schalen- oder Krustenbildung.

Durchfeuchtung wird durch folgende Merkmale deutlich: Die Oberfläche des Mauerwerks oder des Putzes ist dunkel verfärbt; die dunkle Fläche wird durch mäandrierende Wasserstandslinien umsäumt; weiße Ausblühungen finden sich am Rand der Verfleckung. Diese Zustände müssen exakt beschrieben und fotografiert werden. Oft lässt sich das Modern an durchfeuchteten Stellen ganz gut riechen. Wiederum misst der Gutachter die durchfeuchteten Stellen, um ihr Ausmaß am Mauerwerk zu kartieren.

6.4.1 Feuchtemessverfahren

Im Bauwesen werden sehr oft die gravimetrischen, direkten und die chemischen, indirekten Feuchtemessverfahren angewendet. Am häufigsten sind die elektrischen Feuchtemessverfahren in Gebrauch (Venzmer 2001). Darüber hinaus werden bei (Arendt 1994) eine Fülle von weiteren Feuchtemessverfahren vorgestellt.

Die gravimetrische Methode zur Feuchtemessung, die Darr-Methode, ist ein zerstörendes Verfahren, denn es misst die Feuchte dem Mauerwerk entnommener Bohrkerne, die im Labor gewogen, getrocknet und wieder gewogen werden (s. Tab. 6.2). Die festgestellte Massendifferenz ergibt den Wassergehalt der Probe in Masse-Prozent.

Chemische Feuchtemessverfahren finden zur Bestimmung der Mauerwerksfeuchte häufig Anwendung. Das allgemein bekannte Verfahren dafür ist das Calciumcarbid-Verfahren, das zumeist CM-Verfahren (Carbid-Methode) genannt wird. Dabei wird dem Mauerwerk eine kleine Materialprobe von bis zu 20 g entnommen. Die Probe wird anschließend sorgfältig zerkleinert. Danach wird eine genau abgewogene Menge der Probe in das CM-Gerät gefüllt und trockenes, in einer Glasampulle befindliches Kalzium-Carbid dazugegeben, ebenso drei genormte Stahlkugeln. Nach dem Verschluss der Druckflasche wird das CM-Gerät kräftig geschüttelt. Durch die in ihm befindlichen Stahlkugeln wird die Glasampulle zerstört und das Carbid freigesetzt. Durch die danach ablaufende chemische Reaktion des Kalzium-Carbids (es entsteht Acetylengas) steigt der Druck im CM-Gerät an. Über ein an der

Tab. 6.2 Untersuchungen zur Feuchte von Baustoffproben im Labor

Kriterien	Verfahren	Ergebnisse
Feuchtegehalt	Darmmethode	Masse-% Feuchte
	Calciumcarbid-Bestimmung	Bestimmung des Durchfeuchtungsgrades, Feuchtebilanz
	CM-Bestimmung	
Maximale Wasseraufnahme	Sättigungsfeuchte (gleiche Verfahren wie beim Feuchtegehalt)	Masse-% Feuchte Bestimmung des Durchfeuchtungsgrades
Kapillare Wasseraufnahme	Steighöhe (gleiche Verfahren wie beim Feuchtegehalt)	In mm bezogen auf die Prüffläche, Bestimmung des Durchfeuchtungsgrades
Hygroskopische Wasseraufnahme	Masseänderung unter konstanten Klimabedingungen	Ausgleichsfeuchte in Masse-%
Wasserdampfdiffusionsfähigkeit	Diffusionsmessungen	Bestimmung der Diffusionswiderstandszahl μ
Spezifische Gasdurchlässigkeit	Permeabilitätsmessungen	In pPm (Pikoperm)
Bestimmung von mikrobieller Belastung	Keimzahlbestimmungen auf verschiedenen Nährmedien; Identifizierung von Mikroorganismen wie Moose, Pilze, Flechten, Algen, Cyanobakterien, Bakterien, Aktinomyzeten; Analyse von organischen Substanzen wie Chlorophyll und -derivate, Protein, DNA, Zucker, Polysaccharide, Pigmente;	Bestimmung der Biokorrosionsrate
Hydrophobierungsversuche	Imprägnierung	Aufnahme und Wirksamkeit von Imprägnierungs- und Konservierungsmitteln, Widerstand gegen Salzlösungen

Druckflasche montiertes Manometer kann der Druck abgelesen werden. Die Größe dieses entstehenden Gasdrucks ist ein Maß für die in der Materialprobe enthaltene Feuchtigkeit: je mehr Feuchtigkeit, desto höher der entstehende Druck.

Elektrische Feuchtemessverfahren stellen indirekte, niederfrequent arbeitende Methoden dar. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um zerstörungsfreie Prüfverfahren mit handlichen Widerstandsmessgeräten vor Ort, die allerdings die direkte Bestimmung des Feuchtegehaltes des Mauerwerks nicht zulassen. Es wird vielmehr ein Wert innerhalb eines bestimmten Volumens des zu messenden Mauerwerks erkannt. Es kann jedoch, abhängig vom eingesetzten Gerät, immer nur das Mauerwerk und nicht der einzelne Baustoff bewertet werden. Da durch die Messung die physikalischen Eigenschaften des Mauerwerks oder seiner jeweiligen Baustoffe nicht bekannt sind, handelt es sich bei diesen indirekten Messungen nur um qualitative Aussagen. Es wird angezeigt, wie feucht das Mauerwerk an der gemessenen Stelle ist (Weber und Hafkesbrink 2008).

Bei salzbelasteten Mauerwerken sind Feuchtemessungen vor Ort mit zerstörungsfreien elektrischen Handmessgeräten wie etwa dem Gann-Kugelkopf-Hydrometer nicht anzuraten. Die Messergebnisse bei diesen Untergründen sind viel-

fach nicht brauchbar. In der Baupraxis können jedoch solche Messgeräte nützliche Hilfsmittel zur qualitativen Schadensbegutachtung sein, wenn man die bekannten Fehlerquellen wie z. B. Salze im Mauerwerk, berücksichtigt und keine quantitative Messung der Bauteilfeuchte anstrebt. Allerdings können die Messergebnisse im Sinne des Messenden verfälschend interpretiert werden (Arendt 1994).

6.4.2 Weitere Untersuchungen und Messverfahren

Bevor also kurzerhand der Rat erteilt wird, durch eine neue Drainage das Fundament trockenzulegen und zudem einen Sperrputz aufzubringen, um das vermeintlich drückende Grundwasser abzuleiten, sollten alle wasserführenden Leitungen in und um das Gebäude auf ihre Tauglichkeit hin untersucht werden. Die Kanäle werden mit einer kleinen Videokamera befahren (Abb. 6.11).

Manifest gewordene Verformungen wie Krümmungen, Durchbiegung, Ausbauen, Schiefstellung, Risse, etc. lassen sich mit der Wasserwaage, Lot oder Senkel, einer Schlauchwaage oder dem Nivelliergerät rasch erfassen. Wenn solche bleibenden Verformungen am Mauerwerk vorhanden sind, ist in aller Regel ein verformungsgetreues Aufmaß unabdingbar.

Bei sehr starken Schieflagen oder Ausbauchungen muss unbedingt geprüft werden, ob die Standsicherheit überhaupt noch gegeben ist. Gegebenenfalls muss bereits in dieser Phase der Untersuchung die Sicherung einsturzgefährdeter Bauteile veranlasst werden. Außerdem muss festgestellt werden, ob der Verformungsvorgang bereits abgeschlossen oder noch virulent ist. Der Gutachter beobachtet zu diesem Zweck die vorhandenen Risse daraufhin, ob ihre Rissflanken verschmutzt und verkrustet oder frisch und bruchrau sind. Verschmutzte Rissflanken zeigen mit großer Wahrscheinlichkeit an, dass die Rissbildung seit langem abgeschlossen ist. Um zu prüfen, ob die Risse noch virulent sind, setzt man datierte Gipsmarken auf die Rissflanken. Reißen diese nach wenigen Tagen, ist der Riss noch dynamischen Kräften ausgesetzt. Man kann für die genauere Messung der Beweglichkeit der Rissflanken Setzdehnungsmesser benutzen. Die Rissbreite wird sehr genau mit Hilfe von Abstandswinkeln und einer Mikrometerschraube gemessen. Noch exaktere Ergebnisse lassen sich mit einem Rotationslaser oder einem Theodoliten erzielen. Auf diese Weise erkennt der Gutachter das Ausmaß noch wirkender, aktiver, dynamischer Kräfte oder kann sich vergewissern, dass die Setzungs- bzw. Schiefstellungs- und Ausbauchungsvorgänge bereits abgeschlossen sind (Abb. 6.12).

Besonders offenkundig sind die meisten biologischen Einflüsse auf das Mauerwerk wie Bewuchs mit Moosen, Algen oder größeren Pflanzen (Abb. 6.13).

Auch der ungehinderte Andrang von Fäkalien ist leicht zu riechen. Tierischer Befall durch Tauben, Mäuse, Wespen oder Ameisen ist häufig nur durch genaues Beobachten feststellbar, in der Regel findet man den Kot der größeren Tiere; die Insekten erkennt man an von ihnen errichteten typischen Haufen oder Nestern. In den Taubenkadavern leben in der Regel Zecken, die höchst gefährlich für die Bewohner des Gebäudes werden können. Mauerwerke können aber auch geschützten Tierarten eine Heimstatt bieten, z. B. fand der Verfasser schon Eulen, Turmfalken und

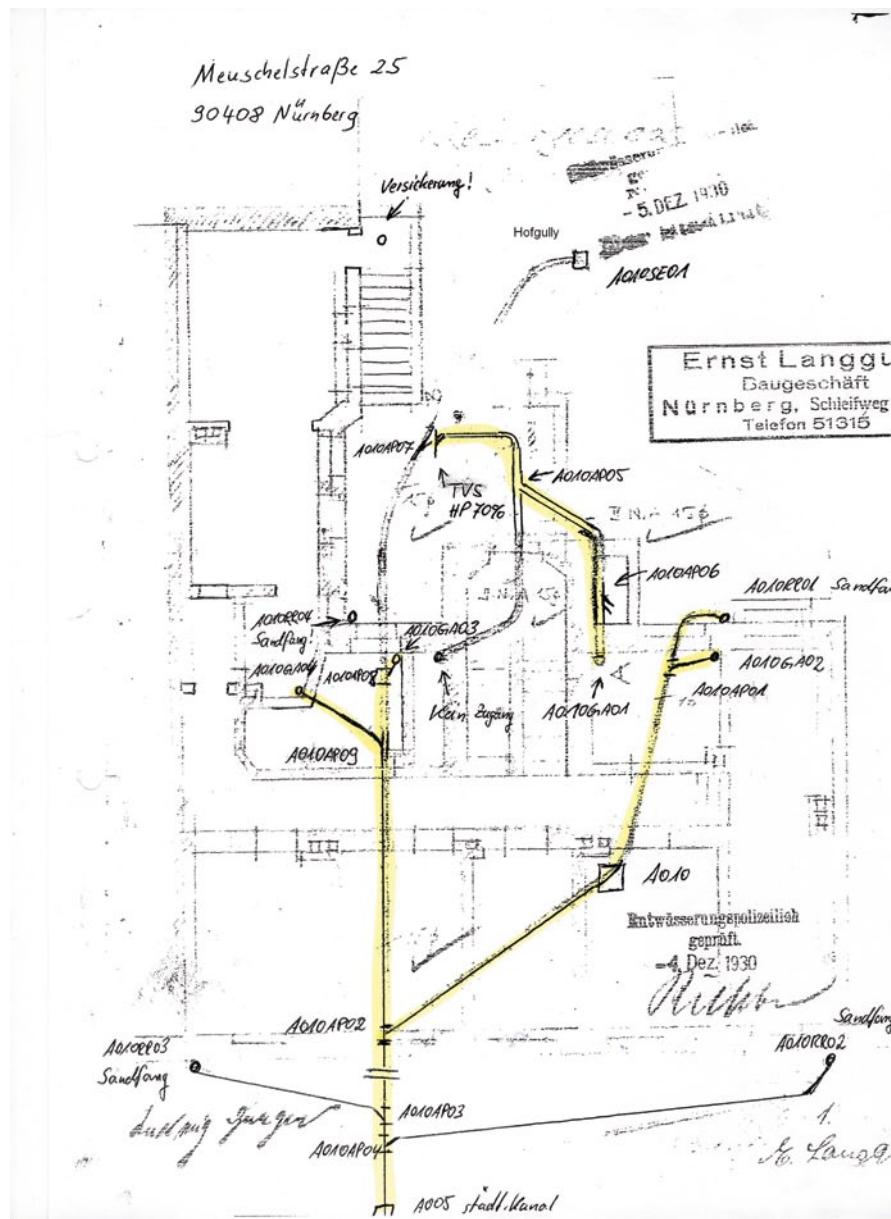


Abb. 6.11 Überprüfung des Schmutzwasserkanals mit Hilfe einer kleinen Videokamera

Fledermäuse in Löchern im Mauerwerk. Sowohl das Beseitigen oder Umsetzen von Tieren und Pflanzen als auch das Entfernen von tierischem Kot oder Kampagnen gegen Taubenzecken durch eine große Anzahl von Besprühungen kann durchaus umständlich sein und eine Instandsetzungsmaßnahme sehr hinauszögern.

Abb. 6.12 Mit einem Setzdehnungsmesser lassen sich die Bewegungen der Rissflanken genau messen



Abb. 6.13 Büsche wachsen auf der Stützmauer



Um Zerklüftung und Hohlräume im zweischaligen Mauerwerk zu erkennen, setzt man das Endoskop ein. Der Gutachter benutzt am besten Fehlstellen in der Außenschale des Mauerwerks, durch die er den Stab seines Endoskops mit dem Okular ins Mauerinnere einschiebt. Manchmal sind auch Bohrungen mit wenigen Millimetern Durchmesser erforderlich, um das Endoskop ins Mauerinnere einzubringen. Zum Endoskopieren gibt es im Handel starre und flexible, verlängerbare Endoskope mit Video-, Computer- oder Kameraanschluss und Videoprinter. Damit lassen sich aber nicht nur Fehlstellen und Hohlräume im Mauerwerk beobachten, sondern alle Spalten und Risse, selbst an den unzugänglichen Stellen, ohne dass das Mauerwerk zusätzlich beschädigt werden muss (Abb. 6.14).

Weitere Erkenntnisse verschaffen Verfahren wie die Thermographie: eine Infrarotkamera erzeugt Wärmebilder von Energieverlustzonen an den Außenwänden eines Gebäudes, die sog. „Wärmebrücken“ werden sichtbar. Unter dem Verputz befindliche Fugen, größere Hohlstellen, Materialwechsel etwa von Naturstein zu Backstein oder ins Mauerwerk eingebaute Holzbalken werden sichtbar. Allerdings

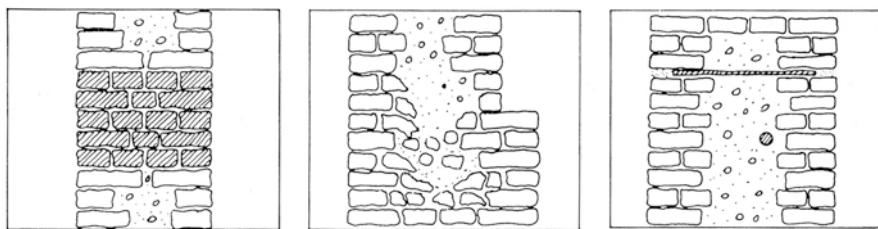
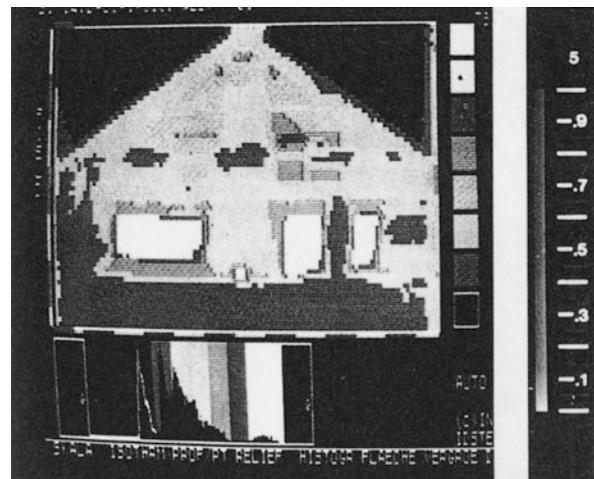


Abb. 6.14 Links Nachträgliche Um- und Einbauten z. B. Verstärkungen, Reparaturen. Mitte Stellenweise innere Verwitterung von Steinen und Mörtel. Rechts Eiserne Anker, Nadeln, Spannglieder

Abb. 6.15 Thermographie. Die untere, dunkle, kältere Zone der Außenwand zeigt die aufsteigende Feuchte an



muss auch eine Reihe von Randbedingungen erfüllt sein, damit tatsächlich von unterschiedlichen Bauteiltemperaturen auch auf Materialunterschiede geschlossen werden kann. Sonne, Regen, Wind, aber auch Wärmequellen im Gebäudeinneren müssen den gesamten, zu untersuchenden Mauerwerksteil gleichermaßen beeinflussen, da sonst das Ergebnis von vornherein verfälscht wird. Will man Innenwände zwischen ziemlich gleich warmen Räumen untersuchen, wird ein künstliches Aufheizen der Wände erforderlich, denn sonst könnte kein unterschiedlicher Wärmedurchgang erfasst werden (Abb. 6.15). „Die Aussagefähigkeit dieser Untersuchungsmethode wird häufig überschätzt, vor allem sollte die Kosten-Nutzen-Relation darüber nachdenken lassen, daß auch Klopfen, kleinflächiges Öffnen, Helligkeitsunterschiede bei Beregnen oder Abtrocknen und anderes eine kostengünstige Aussage erlauben.“ (Arendt 1994)

Die Anwendung von Ultraschallgeräten, mit denen Bauteile auf Hohlräume oder die Grenzfläche zwischen verschiedenen Mauermaterialien untersucht werden, ermöglicht vor allem Aufschlüsse über vorhandene Rohrleitungen und deren Wandstärke. Es handelt sich um ein aufwendiges Verfahren, die Auswertung geschieht über einen Bildschirm.

Abb. 6.16 Streiflicht macht Putzschäden sichtbar



Einen Aufschluss über wechselnde Verputze oder etwa über nachträgliches Verschließen von Öffnungen ergibt das Beleuchten mit Streiflicht. Dazu benötigt man entsprechend starke Baustrahler oder Fotografierlampen. Dabei werden Oberflächenstruktur und Bearbeitungsspuren, Einritzungen und Oberflächenkorrosion sehr deutlich. Mit einer Kamera lässt sich das Ergebnis im Bild festhalten (Abb. 6.16).

Mit Hilfe einer Messlupe mit einer 0,1 mm Skala, einer Taschenlampe oder Halogenleuchten lassen sich Rissebilder erkennen. Deutlich sieht man dabei Breite, Länge, Verlauf, Rissuferausbildung, oft auch Risstiefe, Rissmuster und gegebenenfalls bevorzugte Rissrichtungen. Diese Beobachtungen bilden die Grundlage für die Beurteilung der Standsicherheit und der Wirkungszusammenhänge im Kraftabfluss. Dazu gehört auch die Gefälleermittlung von Simsse und Fensterbänken, die man leicht mit einer Wasser- bzw. Schlauchwaage durchführen kann. Man gewinnt dabei Erkenntnisse über Schiefstellungen und das Abtropfen von Regenwasser.

Bei besonders großen und aufwendigen Mauern kann eine Radarsonde hilfreich sein, mit der man auch das Fundament überprüfen kann. Normalerweise genügt die bereits genannte Sondage (Abb. 5.2), um Art, Umfang und Tiefe des Fundaments zu erkennen. Oft werden auch Metallsuchgeräte eingesetzt, die alte Münzen, aber auch Rohrleitungen auffinden lassen.

Schließlich sei noch auf raumklimatische Messungen hingewiesen. Mit ihrer Hilfe wird die Luftfeuchte und Lufttemperatur, die Raumtemperatur und die relative Feuchte, die Luftmenge und ihre Bewegung bestimmt. Diese Parameter sind zur Feststellung der Feuchtigkeit im Mauerwerk unverzichtbar. Die Wissenschaft hat dazu Geräte entwickelt, etwa den Aspirationspsychrometer nach Assmann, den Thermohygrographen, den Luftfeuchteferngeber, elektronische Temperaturmessgeräte, den Flügelradanemometer und für die tägliche Praxis die elektronischen Feuchtemessgeräte (Arendt 1994).

Die Aufzählung kann niemals vollständig sein, denn beinahe alljährlich werden in den einschlägigen Fachzeitschriften neue Verfahren veröffentlicht. Allein

in der Zeitschrift „*Bauinstandsetzen*“ wurden laufend neue oder altbewährte Verfahren mit neuen Aspekten vorgestellt, z. B. Venderickx und Van Gemert (2000), Geo-Electrical Survey of Masonry for Restoration Projects, [Anwendung einer geoelektrischen Untersuchungsmethode für Mauerwerk im Rahmen eines Instandsetzungsvorhabens]. Die Messung geo-elektrischer Spannungsunterschiede wird als zerstörungsfreie Prüfmethode für altes Mauerwerk vorgestellt. Diese Methode erlaubt es, das innere Gefüge und den Zustand des Mauerwerks sichtbar zu machen. Der gemessene Wert hängt allerdings von den beiden Parametern „*Feuchtegehalt*“ und „*Konzentration gelöster Salze*“ ab. Mit Hilfe der Geoelektrik lassen sich feuchte Bauteilbereiche orten, die dann gezielter beprobt werden können (Wenzel et al. 2000; Degryse et al. 2001). Sie stellen eine leistungsfähige Methode zur Prüfung von Frostbeständigkeit von Mörteln vor.

6.5 Entscheidung über das weitere zielgerichtete Vorgehen

Nach Abschluss der Anamnese und der ersten, kurSORischen Schadensaufnahme vor Ort ist der Zeitpunkt gekommen, an dem sich beurteilen lässt, welche weiteren Untersuchungen erforderlich sind, um eine erfolgversprechende Instandsetzungsmäßnahme einzuleiten. Bei hinreichend schwierigen Objekten wird man Art und Anzahl der Untersuchungen regelrecht planen müssen. Dabei sollten immer die substanzschonenden Untersuchungsmethoden bevorzugt und auf den tatsächlich notwendigen Umfang begrenzt werden. Dies auch dann, wenn es sich um Mauerwerk in einem Baudenkmal handelt. Die Referenten der Landesdenkmalämter haben sich inzwischen verstärkt angewöhnt, Erkenntnisse für eigene Forschungsvorhaben aus für die Instandsetzung eigentlich überflüssigen Untersuchungsmäßigkeiten zu gewinnen. Beispielsweise werden gerne komplette Wandabwicklungen, wo einzelne Bestandsfotos durchaus ausreichen, oder dendrochronologische Daten, wo eine Altersbestimmung gar nichts zur Sanierung beiträgt, gefordert.

Auch der Zeitbedarf und -aufwand für Untersuchungen, insbesondere bei jahreszeitlich bedingten Überprüfungen etwa des hygroskopischen Feuchteverhaltens eines Mauerwerks oder für raumklimatische Messungen muss eingeplant werden. Die Eingriffsstelle zur Probenahme am Mauerwerk muss gegebenenfalls mit den Beamten der Landesdenkmalämter abgestimmt werden. Insbesondere werden die Entnahmestellen, die Art und der Umfang der Entnahme solcher, die Originalsubstanz zerstörende Probenahmen festgelegt.

Häufig sind für die weitere Untersuchung Sonderfachleute erforderlich. Sie unterbreiten Vorschläge für geeignete Untersuchungsschritte aus ihrem Fachgebiet. Es empfiehlt sich, dafür Kostenangebote einzuholen. Dazu muss allerdings eine Art Leistungsverzeichnis erstellt werden, aus dem Ort, Zeitpunkt, Anzahl und Umfang der Probenahmen, die gewählte Untersuchungsmethode und gegebenenfalls denkmalpflegerische Auflagen für die Probenahme hervorgehen. Außerdem sollte der ausschreibende Ingenieur die Dimension der Messergebnisse angeben, z. B. ob bei Salzanalysen Masse-% oder Volumen-% zugrunde gelegt werden sollen. Auf diese

Weise kann erreicht werden, dass die verschiedenen Untersuchungen für ein und dasselbe Objekt miteinander stets vergleichbar sind. Ist dies nicht der Fall, entsteht bei der Vielzahl der notwendigen Untersuchungsgutachten ein Chaos und Wirrwarr wahrhaft babylonischen Ausmaßes auf dem Schreibtisch des Architekten bzw. des zuständigen Baubeamten.

6.6 Erstellen von Planunterlagen

Um alle Ergebnisse der Untersuchungen in Planunterlagen eintragen zu können, müssen immer dann, wenn dienliche Pläne fehlen, geeignete Planunterlagen hergestellt werden. Die Pläne können je nach Schadhaftigkeit oder Bedeutung des jeweiligen Mauerwerks abgestuft aufwendig werden. Bei einfacheren Bauten tut es meist das oben beschriebene Handaufmaß des Architekten allein. Es enthält alle notwendigen Grundrisse, Schnitte und Fassadenaufrisse im Maßstab 1:100.

Das Landesdenkmalamt Baden-Württemberg hat beispielhafte „*Empfehlungen für Bauaufnahmen*“ (Eckstein und Gromer 1990) herausgegeben. Sie bringen die Problematik Bauaufnahme in ein konkretes, für die tägliche Praxis brauchbares System von vier Genauigkeitsstufen, die hier wiedergegeben werden:

Genauigkeitsstufe I Aufmaß im Maßstab 1:100

Schematische, jedoch vollständige Darstellung durch direktes Auftragen vor Ort oder anhand von Messblattskizzen mit anschließendem Auftragen in Freihandzeichnung oder am Reißbrett. Bauschäden, Verwerfungen und Durchbiegungen brauchen nicht dargestellt zu werden. Ausarbeitungsgrad: Ungefähr maßstäbliche Freihandzeichnung bis Baugesuchsgenauigkeit.

Ergebnis: Einfache Dokumentation eines Gebäudetyps in Grundrissgliederung, Höhenentwicklung, Form und Außenerscheinung. Die Pläne sollen als Besprechungsgrundlage bei Vorplanungen dienen oder bei Renovierungsmaßnahmen mit geringen Eingriffen (Abb. 6.17).

Genauigkeitsstufe II Aufmaß im Maßstab 1:50 oder 1:100

Annähernd wirklichkeitsgetreues Aufmaß als Grundlage für einfache Sanierungen ohne weiterführende Umbaumaßnahmen oder als Grundlage für Orts- und Stadtbildanalysen sowie für vorsorgliche Dokumentationen auch im Rahmen der klassischen Inventarisierung.

Ergebnis: Annähernd wirklichkeitsgetreue Dokumentation eines Baubestandes mit der Feststellung des hauptsächlichen, konstruktiven Systems. Die Pläne sollen als Grundlage für einfache Sanierungs- und Sicherungsmaßnahmen sowie zur Kartierung restauratorischer Untersuchungen nutzbar sein. Weiterhin sollen sie die Grundlage für bauhistorische Untersuchungen an einfacheren Einzelgebäuden bilden (Abb. 6.18).

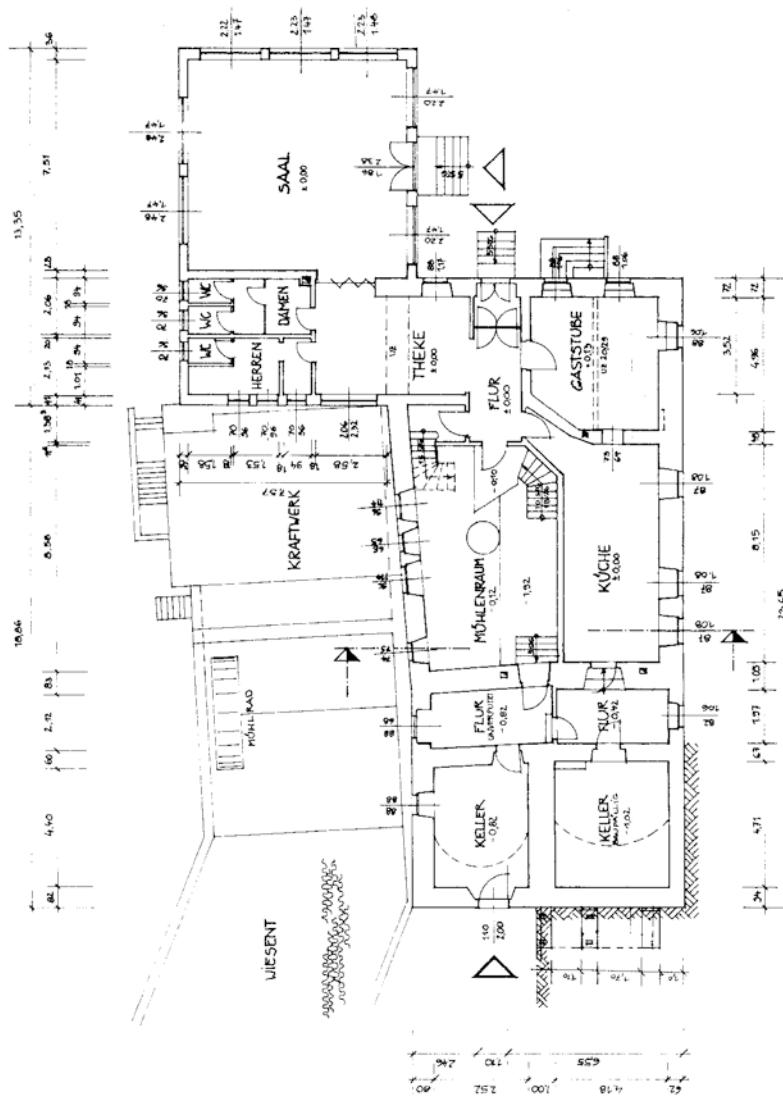


Abb. 6.17 Schottersmühle/Oft., Erdgeschoss. Handaufmaß des Verfassers (verkleinert). Genauigkeitsstufe I

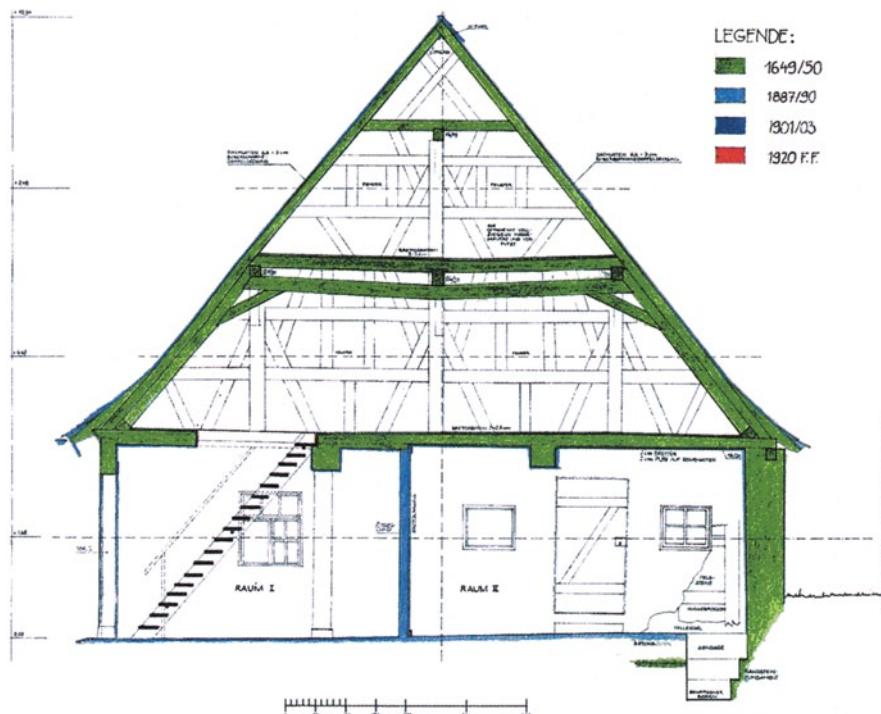


Abb. 6.18 Bamberg, Kutschenremise. Verformungsgetterer Querschnitt durch das Gebäude. Mit verschiedenen Farben sind die Baualtersstufen verschiedener Bauteile eingetragen. Genauigkeitsstufe II

Genauigkeitsstufe III Aufmaß im Maßstab 1:50

Exaktes und verformungsgetreues Aufmaß, das auch den Erfordernissen der Bauforschung genügt und die Grundlage für Umbaumaßnahmen bildet. Voraussetzung für das verformungsgetreue Aufmaß ist ein dreidimensionales Vermessungssystem, auf das außerhalb und innerhalb eines Gebäudes in allen Räumen die Detailaufnahme aufgebaut ist. Die Höhen sind auf NN zu beziehen. Grundrisspläne, Schnitte und Ansichten müssen über Netzkreuze oder Passpunkte auf- oder aneinandergepasst werden können. Die Auftragungen müssen vor Ort erfolgen. Die Darstellungsgenauigkeit muss innerhalb $\pm 2,5$ cm liegen. Wenn erforderlich, werden die gemessenen Werte mit eingetragen.

Ergebnis: Wirklichkeitsgerechte Dokumentation für Restaurierungs- und Umbauplanungen sowie für die Zwecke der wissenschaftlichen Bauforschung, der statischen Sicherung und der planungsvorbereitenden Bauzustandsanalyse (Abb. 6.19).

Genauigkeitsstufe IV Aufmaß im Maßstab 1:25 oder größer

Exaktes und verformungsgetreues Aufmaß, das den Erfordernissen der Bauforschung genügt und die Grundlage für schwierige Umbaumaßnahmen bildet.

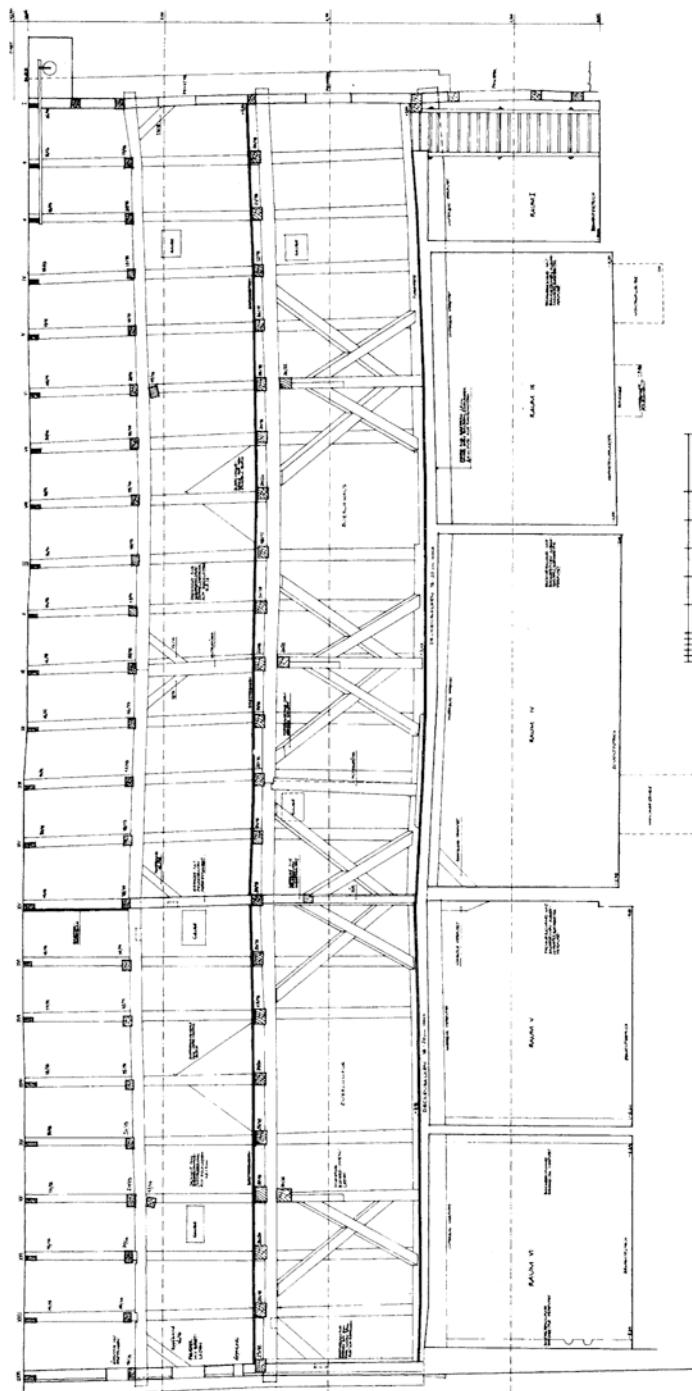


Abb. 6.19 Bamberg, Kutschentremise. Verformungsgetreues Aufmaß, Längsschnitt (verkleinert). Deutlich ist die Schieflage im Giebelbereich (rechts) erkennbar. Genauigkeitsstufe III

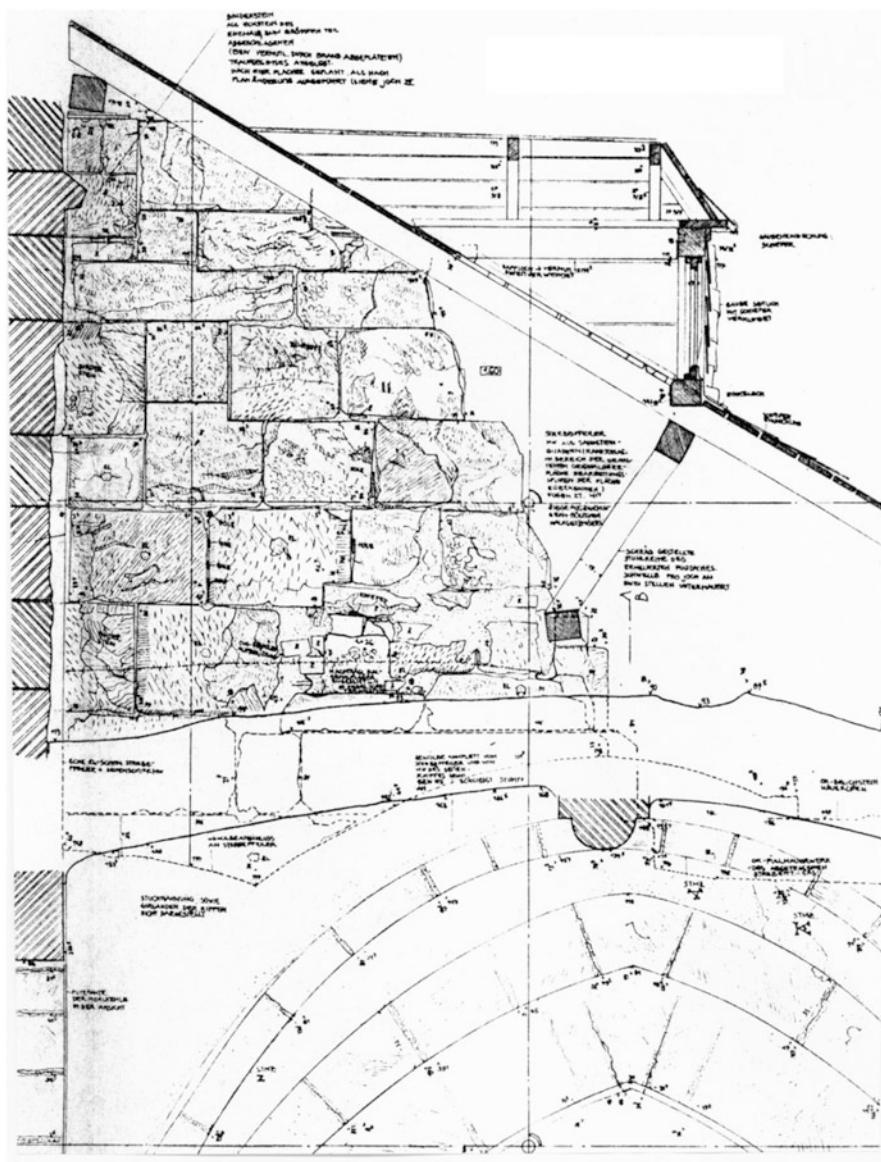
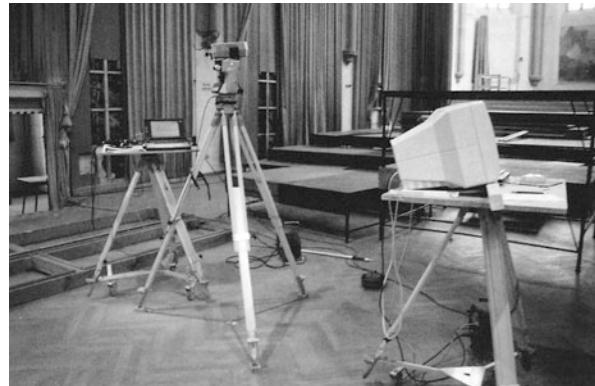


Abb. 6.20 Ebrach, Pfarrkirche, südliches Langhaus (LS). Steingenaues Aufmaß des Mauerwerks über dem Gewölbe

Die messtechnischen Voraussetzungen für das verformungsgetreue Aufmaß sowie die Planinhalte entsprechen der Genauigkeitsstufe III. Die Darstellungs- genauigkeit muss innerhalb ± 2 cm liegen. Bei höheren Anforderungen, z. B. bei Untersuchungen für die statische Sicherheit, muss die Darstellungsgenauigkeit der möglichen Messgenauigkeit bei vertretbarem Aufwand entsprechen: Maßstab 1:20=Genauigkeit ± 1 cm, Details im Maßstab 1:10=Genauigkeit $\pm 0,5$ cm. Groß-

Abb. 6.21 Bamberg, Dominikanerkirche, stein-genaues verformungsges-treues Aufmaß. Hier werden elektronische Geräte wie Lasertheodolit und Computer mit entsprechender Software eingesetzt



maßstäbliche Bauaufnahmen sind erforderlich, wenn bei Translozierungen und Rekonstruktion früherer Bauzustände kleinste Hinweise erfasst werden müssen. Da solche Details oft erst im Zuge der Baumaßnahmen, nach Abschlagen des Verputzes, nach Herausnehmen der Ausfachungen oder beim Auswechseln oder Abnehmen von Bauteilen erkennbar sind, muss gewährleistet sein, dass diese Informationen in den Plänen nachgetragen werden. Sinn der großmaßstäblichen Bauaufnahmen sind die größere Darstellungsgenauigkeit, z. B. für statische Aussagen, und die Möglichkeit der detaillierten Darstellung, z. B. bei Fenster- und Türlaibungen und Zierelementen sowie Doppellinien bei Steinfugen und Fachwerksverbindungen. Bauaufnahmen in der Genauigkeitsstufe IV wurden für hochwertige Objekte mit hohem Schwierigkeitsgrad benötigt, bei denen detaillierte und genaue Darstellungen erforderlich sind.

Ergebnis: Großmaßstäbliche und verformungsgetreue Dokumentation für alle Zwecke der wissenschaftlichen Bauforschung, der statischen Sicherung und der planungsvorbereitenden Bauzustandsanalyse sowie komplizierten Umbaumaßnahmen, für Translozierungen und für Rekonstruktionen (Abb. 6.20).

6.6.1 Fotogrammetrie

Eine alternative Aufnahmemethode stellt die moderne Fotogrammetrie dar (Richter 1990). Sie beruht auf den alten Verfahren der projektiven Transformation und der Radialtriangulation. Bereits 1848 hat der Architekt A. Meydenbauer in Berlin die Messstischfotogrammetrie betrieben, seine Fotoplatten sind heute noch im Meydenbauer-Archiv in Berlin vorhanden. Moderne Fotogrammetrie wird unter Einsatz von Taschencomputern bei der Passpunktbestimmung erst wirtschaftlich sinnvoll und kann im Rolleimetrik- oder in einem anderen, computergestützten Verfahren durchgeführt werden. Da es sich um ein stereometrisches Messverfahren handelt, ist sie vor allem dann zu empfehlen, wenn rekonstruktive Maßnahmen geplant sind, d. h. wenn Teile eines Mauerwerks, z. B. seine Bekrönung oder auf ihm applizierter plastischer Dekor, von ihrer Substanz her so verfallen sind, dass sie mit Hilfe neuer Materialien wiederhergestellt werden müssen (Abb. 6.21).

6.7 Probenahme mit Eingriffen in die Gebäudesubstanz

Zerstörungsfreie Untersuchungen am Bauwerk genügen oft nicht, den Informationsbedarf umfassend sicher zu stellen. Deshalb müssen in vielen Fällen Eingriffe in die Gebäudesubstanz vorgenommen werden: angefangen bei geringfügigen, zerstörungssarmen wie Bohrlöcher für die Endoskopie über umfangreichere Probenahmen verbunden mit Kernbohrungen bis hin zu großflächigen, zerstörungsintensiven Öffnungen der Mauerwerksoberfläche. Aus diesem Grund empfiehlt es sich vor großflächigem Öffnen eines Mauerwerks, zunächst die einzelnen Oberflächenschichten zu untersuchen und zu dokumentieren.

Bei Baudenkmalen muss der Restaurator den Aufbau von Putz und die Aufeinanderfolge von Farbschichten erkennen. Dazu fertigt er geeignete Freilegungsschnitte an, welche die Aufeinanderfolge von Farbschichten auf der Wand- und Verputzoberfläche anzeigen. Damit gewinnt man auch Erkenntnisse über Art und Umfang früherer Raumfassungen. Grundsätzlich wird dabei die nackte Mauerwerksoberfläche als Schicht mit der Ziffer 0 bezeichnet, die jeweils nächste Schicht mit den Ziffern 1, 2, 3, usw. Die Freilegungsschnitte werden abgetrepppt angelegt, um die jeweilig gefundene Schicht partiell in einem schmalen Streifen zeigen zu können. Mit Hilfe solcher Freilegungsschnitte lässt sich außerdem eine relative Chronologie der Wandfassungen erstellen (Abb. 6.22).

Erst wenn sichergestellt ist, dass durch eine größere Öffnung keine relevante Wandfassung gestört wird, können Eingriffe in die Gebäudesubstanz vorgenommen werden. Für den Tragwerksplaner wird es notwendig sein, wirksame Knotenpunkte der Stabilität im Mauerwerk wie beispielsweise Gewölbewiderlager freizulegen. Dies sollte nur mit geringfügigem Entfernen von Wandputz oder Fußbodendielen möglich sein, obwohl die Statiker sehr gerne großflächige Öffnungen bevorzugen. Gleichwohl verlangen verantwortungsbewusste Tragwerksplaner manchmal zu Recht das Entfernen ganzer Wandbereiche, um einen stark geschädigten Knotenpunkt umfassend beurteilen zu können. Solche zerstörungsintensive Eingriffe in die Mauerwerkssubstanz sind immer dann notwendig, wenn die ersten vorsichtigen Verfahren nicht aufschlussreich genug gewesen sind (Abb. 6.23).

Dies trifft auch auf die Sicherung von archäologisch bedeutsamen Befunden unter dem Gebäude wie Gräber, alte Brunnen oder Reste historisch aufschlussreicher Fundamente und Mauern zu. Archäologen graben häufig den gesamten Fundamentbereich neben der instandzusetzenden Mauer auf, um die Vorgeschichte des Gebäudes zu klären oder legen Sondagegräben quer durch die Mauer oder sogar durch das zugehörige Deckenprofil (Abb. 6.24).

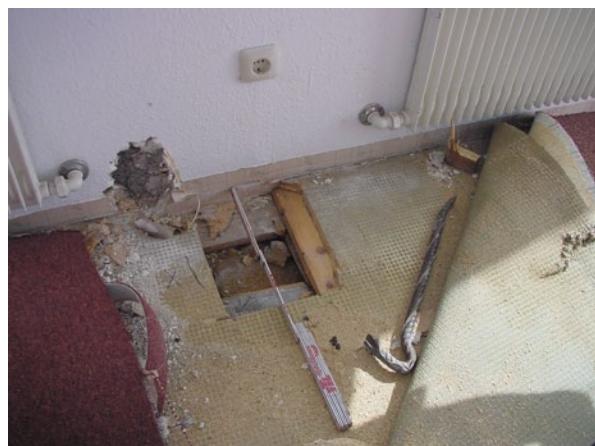
Auch Baugrunduntersuchungen und Beobachtung der Grundwasserströme erfordern oftmals große Schürfgruben außerhalb und innerhalb des Gebäudes. Zu beiden Erkundungsmaßnahmen gehört immer auch ein großer Zeitbedarf, der in der Untersuchungsplanung Berücksichtigung finden muss (s. Abb. 5.2).

Viele Versuche zum Einsatz von Bohrwiderstandsmessgeräten wurden durchgeführt. Dabei hat man einige wichtige Parameter, die das Messergebnis erheblich verfälschen können, insbesondere den Kraftaufwand, den die Reibung des Bohrers an der Bohrwand benötigt, zu erfassen versucht. Obwohl diese Randbedin-

Abb. 6.22 Mehrere Freilegungsschnitte an einer historischen Zimmerwand



Abb. 6.23 Öffnung des Fußbodens zur Feststellung der Tragfähigkeit der Wand



gungen den Einsatz eines Bohrwiderstandmessgerätes gerade bei der Untersuchung am Mauerwerk in Frage stellen, werden solche Geräte am Fachwerkholz, z. B. der „densitomat“, durchaus mit Erfolg eingesetzt.

Der Fugenmörtel wird mit der Spitze des Zimmermannshammers eingekerbt, um seine Stabilität zu testen. Außerdem kann sein Kalkgehalt mit Tropfen aus 10 %-iger Salzsäure auch vor Ort nachgewiesen werden. Dazu dient z. B. der Untersuchungskoffer (Kompaktlabor) der Fa. Merck® mit geeigneten Chemikalien und Teststreifen zum Nachweis von Kalkgehalt, pH – Wert des vorhandenen Wassers und vieles anderes mehr. Mit Teststreifen wird indikativ die Aggressivität von Wasser bestimmt; dabei wird kalorimetrisch der pH-Wert des jeweiligen Wassers gemessen.

Die Wasseraufnahme kann man mit Hilfe von Prüfröhrchen nach Karsten feststellen. Dabei wird das Wasseraufnahmevermögen eines mineralischen Baustoffes wie Verputz oder ungeschütztes Mauerwerk als Funktion der Zeit $f(t)$ in ml/min definiert.

Abb. 6.24 Altmorschen, Kloster Heydau. Archäologische Grabung zur Freilegung einer historischen Wasserleitung aus Bleirohren



6.7.1 Probenentnahme

Um die Steine eines Mauerwerks bei einer fälligen Sanierung nicht gänzlich zu ruinieren, ermittelt zuvor ein erfahrener Bautenschutzfachplaner ihre Kenndaten, indem er dem Mauerwerk Proben entnimmt. Dabei sollen vor allem die VDI-Richtlinie 3798 „Untersuchung und Behandlung von immissionsgeschädigten Werkstoffen“ und das WTA-Merkblatt 3-5-98/D „Natursteinrestaurierung nach WTA – Kenndatenermittlung und Qualitätssicherung bei der Restaurierung von Naturwerksteinbauten“ wenigstens bei größeren oder bedeutsamen Objekten Anwendung finden. Die Probeentnahme dient zur Gewinnung von Mauerwerksmaterial für weitere Untersuchungen im Labor. Menge und Art der Proben hängen von dem Untersuchungsziel und den vorgesehenen Untersuchungsmethoden ab. In der Regel sind Proben sowohl vom Mauerstein als auch vom Mauermörtel erforderlich (Abb. 6.25).

Die Anzahl der Probenahmen muss die verschiedenen Schadensformen, Baustoffe und Bauteile berücksichtigen. Die Proben müssen eine ausreichende Größe besitzen. Bei einer geringen Probenzahl und kleinen Proben wird die Inhomogenität im Mauerwerkskörper nicht ausreichend erfasst. Kennwerte aus zu kleinen Proben bzw. zu kleinen Probemengen weichen oft wesentlich von repräsentativen Kennwerten ab. Typische Probengrößen sind:

Abb. 6.25 Kernbohrung in Sandstein**Tab. 6.3** Probeentnahme

Probeentnahme	Werkzeug	Probeart	Grad der Zerstörung	Bewertung
Bohrkernentnahme Trockenbohrverfahren	Diamantbohrkrone	Bohrkern, kompakte, ungestörte Probe	Gering bis stark, je nach Bohrkern Ø	Standardmethode
Bohrkernentnahme Trockenbohrverfahren	Hammerbohrkrone	Bohrkern, gestörte Probe	Gering bis stark, je nach Bohrkern Ø	Standardmethode
Bohrkernentnahme Trockenbohrverfahren	Spiralbohrer	Bohrmehl, gestörte Probe	Gering	Standardmethode
Abschlagen	Hammer, Meißel	Bruchstück, gestörte Probe	Gering bis stark, je nach Probengröße	Standardmethode
Herausschneiden	Trennscheibe	Handstück, kompakte, ungestörte Probe	Stark	Eher selten angewandt
Ausbauen	Verschiedene Werkzeuge	Handstück, kompakte, ungestörte Probe	Sehr stark	Eher selten angewandt
Abschaben	Pinsel, Bürste, Spatel	Mehl, Schale, gestörte Probe	Sehr gering	Standardmethode

- Bohrkern bis \varnothing 10 cm, Länge \geq 12 cm zur Ermittlung von Festigkeitswerten (Tab. 6.3)
- Bohrkern $\varnothing \geq 3$ cm, Länge ≥ 5 cm zur Beurteilung des Gefüges sowie zur Bestimmung des Feuchtegehaltes und des Salzgehaltes
- Bohrmehl 50–100 g/pro Probe zur Bestimmung des Feuchtegehaltes und Salzgehaltes (Tab. 6.4).

Tab. 6.4 Prüfung von Bohrkernen zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften

Prüfung	Druckfestigkeit	Spaltzugfestigkeit	Spaltzugfestigkeit
Probenart	Reiner Stein	Reiner Stein	Fugenbohrkern
Belastung	▼ Bohrkern senkrecht	▼ Bohrkern waagerecht	▼ Bohrkern (Stein + Fuge) waagerecht
	▲	▲	▲
Durchmesser	$d=30\text{--}50\text{ mm}$	$d=50\text{ mm}$	$d=100\text{ mm}$
Schlankheit	$h/d \geq 1,5$	$l/d \leq 1$	$l/d \leq 1$
Probenanzahl	$n \geq 5$	$n \geq 5$	$n \geq 5$

Abb. 6.26 Bohrkern luftdicht verpackt

Art und Zeitpunkt der Probeentnahme sowie die dabei herrschenden klimatischen Bedingungen sind schriftlich festzuhalten. Die Probeentnahmestellen müssen hinsichtlich der Lage, Richtung und der Entnahmekoordinaten mit ihren Höhen- und Tiefenangaben dokumentiert werden. Durch Verpackung, Transport und Lagerung der Proben dürfen sich die Stoffkennwerte, wie sie sich im Mauerwerk eingestellt hatten, z. B. die Materialfeuchte, nicht verändern. Die Proben sollten luftdicht verpackt werden (Abb. 6.26).

Für die Ermittlung bestimmter Kenndaten sind Laboruntersuchungen an aus dem Mauerwerk entnommenen Proben erforderlich.

Typische Laboruntersuchungen sind

- Ermittlung von Festigkeitskennwerten durch Bestimmung der Druck- und Zugfestigkeit
- Baustoffanalysen wie Bestimmung des Bindemittels
- Ermittlung des Wassergehaltes
- halbquantitative und quantitative Salzanalytik durch Bestimmung der Art und des Gehaltes an löslichen Salzionen
- Ermittlung des Porengehaltes
- Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten

Durch geeignete Probenahme muss eine Feuchte- und Salzbilanz gezogen werden. Dabei wird die kapillare Wasseraufnahme in Masse-% bestimmt und der Durchfeuchtungsgrad errechnet. Schließlich wird der Anteil an bauschädlichen Salzen im Labor ermittelt. Die Auswertung dieser Daten lässt ein Feuchteprofil erkennen, mit dem die Art der Feuchteaufnahme im Mauerwerk diagnostiziert werden kann.

Ein typischer Untersuchungsumfang zur Erfassung von Feuchte- und Salzbelastung an einem konstruktiv gleich aufgebauten Bauteil mit visuell beurteilt gleichem Schadensbild ist die Ermittlung von Feuchte und Salzgehalt an sechs Einzelproben. Die Proben werden an mindestens drei Stellen unterschiedlicher Höhenlage in Form eines sog. „*Höhenprofils*“ und mindestens zwei dazugehörigen Tiefenlagen als sog. „*Tiefenprofil*“ entnommen (Abb. 6.27).

Als typisches Beispiel aus der Baustellenpraxis seien hier die Untersuchungen an einem Wohnhaus mit Zahnarztpraxis in Schkeuditz, Lkr. Leipzig, vorgestellt (Weber und Gollwitzer 1995). Bei dem Gebäude handelt es sich um ein zweigeschossiges Wohnhaus mit verputzten Fassaden. Das Mauerwerk besteht bis auf Sockelhöhe aus einem Sandsteinmauerwerk. Die Bruchsteine sind im wesentlichen in Kalkmörtel lagerhaft vermauert worden. Über dem Sockel wurde Backsteinmauerwerk errichtet. Im Putzbereich außen zeigten sich Frost-, Salz- und Feuchtigkeits schäden, die teilweise zu Abplatzungen geführt haben (Abb. 6.28).

Die Bautenschutzfachplaner wurden aufgrund dieser Situation beauftragt, eine Bestandsaufnahme durch Erstellen einer Feuchte- und Salzbilanz vorzunehmen, deren Ergebnisse dann eine Rahmenplanung für die Instandsetzung ermöglichen sollten.

Es wurden Mauerwerks- und Putzproben entnommen. Die Entnahme erfolgte in Form sog. „*Messachsen*“, d. h. die Messstellen wurden übereinander angeordnet, um entsprechende Gradienten der Feuchte- und Salzverteilung ermitteln zu können. Insgesamt wurden sechs Messachsen angelegt, außerdem wurden diverse Einzelproben entnommen. Die genauen Entnahmestellen wurden in einer Planskizze festgehalten. Außerdem wurde über die Probenahme eine Fotodokumentation erstellt.

Mit den durch Kernbohrung entnommenen Baustoffproben wurden folgende Untersuchungen und Messungen durchgeführt:

- Berechnung des Durchfeuchtungsgrades und des hygrokopischen Anteils
- Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach DIN 52 617 an Putzproben
- Bestimmung des Chloridionengehalts
- Bestimmung des Sulfationengehalts
- Bestimmung des Nitrationengehalts
- Bestimmung des Feuchtigkeitsgehalts nach der Darrmethode
- Bestimmung der maximalen kapillaren Wasseraufnahme
- Bestimmung der hygrokopischen Wasseraufnahme

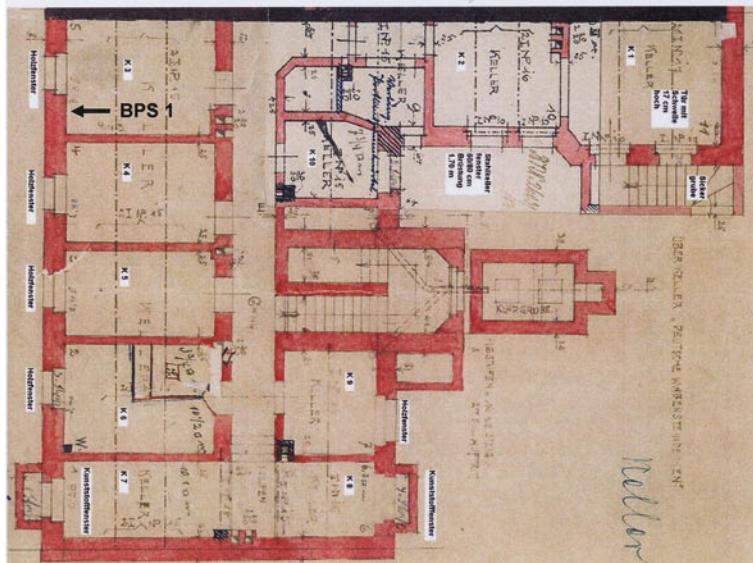
Die erhaltenen Untersuchungsergebnisse wurden in 7 Tabellen zusammengestellt.

Die Laborergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen (Tab. 6.5):

Das Objekt leidet im Kellerbereich unter einer kapillaren Durchfeuchtung durch vertikal eindringendes Wasser sowie durch aufsteigende Mauerfeuchtigkeit. Oberhalb des Erdreiches nimmt der Durchfeuchtungsgrad ab. Dies gilt insbesondere für den unterkellerten Bereich. Im nichtunterkellerten Bereich ist die Durchfeuchtung im Erdgeschoss höher, nimmt aber jedoch bis auf eine Höhe von ca. 1,10 m deutlich ab, so daß hier aufgrund der schlechteren Belüftung ein höherer Durchfeuchtungsspiegel gegeben ist. Die Versalzung ist insgesamt gering. (Weber und Gollwitzer 1995)

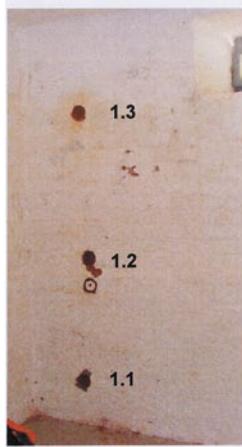
A 2196 / 2009
Anlage 1
Seite 1 / 2

Feuchtestatus von Ziegelmauerwerk



Lage der Beprobungstelle im Bestand

Archiv A 2196/2009-scan



BPS 1 Archiv A 2196/2009-3084

Abb. 6.27 Höhenprofil einer Kernbohrung am Beprobungspunkt 1 (BPS 1)

Abb. 6.28 Zahnarztpraxis in Schkeuditz vor der Sanierung



Tab. 6.5 Untersuchungen zum Salzgehalt von Baustoffproben im Labor

Kriterien	Verfahren	Ergebnisse
Bauschädliche Salze	Nasschemische Analyse	Qualitative und quantitative Gehalte an wasserlöslichen Salzen in Masse-%;
Chloride, Sulfate, Nitrate, Carbonate	Potentiometrische Titration Ionensensitive Elektroden	Salzbilanz
Dünnenschliffuntersuchungen	Durchlichtmikroskopie	Mineralbestandteile, Gefüge, Kornverteilung, Porenraum
Phasenanalyse	Röntgendiffraktometrie	Mineralzusammensetzung
Rasterelektronenmikroskopie REM	Elektronenmikroskopie	Verwitterungs- und Porenbestimmung in Verbindung mit einer Mikrosonde
Frostbeständigkeit in Verbindung mit Salzeinwirkung	Frost-Tau-Wechsel-Versuche	Treiberscheinungen, Risse, Abtrag in mg/cm ² (Masseverlust)
Druck- und Biegezugfestigkeit	Bohrkern ziehen und im Labor prüfen	Mechanische Widerstandsfähigkeit R in N/mm ²
Korrosionsprüfung bei Schadstoffeinwirkung	SO ₂ – Immission Cl – Einwirkung NO ₂ – Immission	Prüfung der Widerstandsfähigkeit gegen saure Immissionen

Erst auf der Basis solcher Erkenntnisse lassen sich wirksame Instandsetzungsvorschläge erarbeiten. Wichtig ist, dass die Probenahme immer in geeignet festgelegten Messachsen geschieht. Diese Achsen lassen schließlich ein Schadensprofil erkennen, mit dem erst das Zusammenspiel aller relevanten Schadensparameter aufgezeigt werden kann.

6.7.2 Standsicherheit und Tragfähigkeit

Eine weitere wichtige Vorbedingung muss die Gewährleistung der Standsicherheit des Mauerwerks und der Tragfähigkeit seiner Oberfläche sein. Sind wie in dem vorgestellten Beispiel an alten Gebäuden Risse sichtbar, muss geprüft werden, ob

Abb. 6.29 Die Löcher in dieser Sandsteinwand im Schlossbergmuseum in Chemnitz wurden teilweise mit PU-Schaum geschlossen



diese noch dynamischer Natur oder inzwischen zur Ruhe gekommen sind. Dies lässt sich – wie oben bereits dargestellt – durch die herkömmliche Gipsmarke oder genauer durch einen Setzdehnungsmesser feststellen (Abb. 6.12). Auch der Verschmutzungsgrad der Rissflanken ist ein guter Parameter dafür. Nach Abschlagen des kontaminierten und geschädigten Putzes lässt sich rasch feststellen, ob die Oberfläche des Mauerwerks noch tragfähig ist. Sind Steine lose, Fugenmörtel fast ohne Bindemittel oder größere Löcher im Mauerwerk vorhanden, müssen diese zunächst maurermäßig bearbeitet werden. Die Löcher aber müssen mit dem gleichen Steinmaterial geschlossen werden, wie es am Mauerwerk vorgefunden wird. Kunststoffe wie Polyurethanschäume und ähnliches sind keinesfalls dafür geeignet (Abb. 6.29).

Wesentlichen Einfluss auf das lokale Tragverhalten, vor allem auf den Bruchmechanismus, übt das Zusammenwirken von Mauerstein und Mörtel aus. Die unterschiedlichen Verbandsarten entscheiden vornehmlich beim Natursteinmauerwerk über dessen Tragfähigkeit. Besonders bei Bruchstein- und Quadermauerwerk sind die Fugengeometrie und die Fugenausbildung, insbesondere die Vermörtelung, mit zu erfassen (Wenzel et al. 2000)

Der Querschnitt des Mauerwerks beschreibt Schale um Schale den Aufbau der Konstruktionsdicke. Beim historischen Mauerwerk werden – wie bereits ausgeführt – einschalige und mehrschalige, in der Regel zweischalige Querschnitte mit dazwischenliegender Füllschicht unterschieden. Beim zweischaligen Mauerwerk hängt die Tragfähigkeit wesentlich vom Verbund, also von der Ausbildung der Kontaktfuge zwischen den einzelnen Schalen, und der Art der Innenfüllung ab. Für den Tragsicherheitsnachweis bei mehrschaligem Mauerwerk ist es von ausschlaggebender Bedeutung, ob die Innenfüllung kohäsiv sich am Lastabtrag beteiligt oder ob sie infolge Bindemittelauswaschungen kohäsionslos geworden ohne die stützenden Außenschalen nicht standfest wäre. Spezielle Untersuchungsmethoden, aber auch bereits der Einblick in das Mauerwerk mit einem Endoskop ermitteln die Dimensionen unzugänglicher Stellen, einzelner Mauerwerksschalen und inhomogener Bereiche im Mauerwerksaufbau. Erst mit der Kenntnis der inneren Gefügebeschaffenheit lässt sich die Abweichung des tatsächlichen Tragfähigkeitszustandes vom Sollzustand abschätzen. Dazu muss man alle Baustoffwechsel, Hohlräume, Fehlstellen

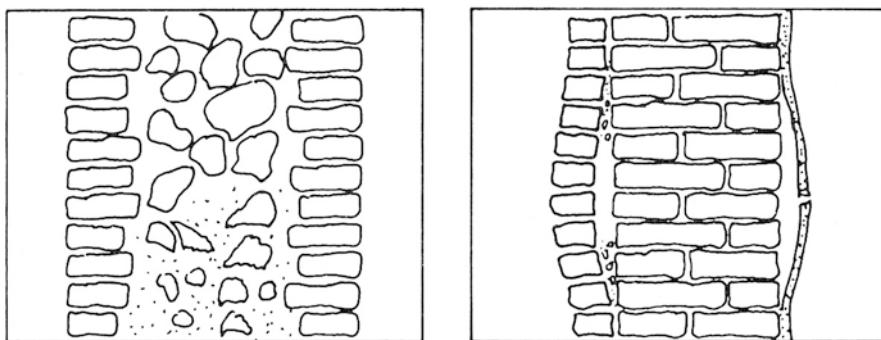


Abb. 6.30 Innerer Aufbau von zweischaligem Mauerwerk: *links* sehr klüftige oder auch abgesackte Innenfüllung von mehrschaligem Mauerwerk; *rechts* Flächige Ablösung äußerer Schichten oder Schalen

Tab. 6.6 Beanspruchung einer Wand

Lastabhängige Einwirkungen	Lastunabhängige Einwirkungen
Kontinuierlich statische Lasten wie Eigen- gewicht, vertikale und horizontale Lasten	Temperatur infolge Sonneneinstrahlung, Frost oder Brand
Diskontinuierliche statische Lasten wie Schnee, Wind, Verkehr	Wasser infolge von Niederschlägen, Kondensation oder Austrocknung
Dynamische Lasten wie Maschinen, Verkehr, Glocken	Chemische Einwirkungen als Folge von Schadstoffimmissionen
	Physikalische Einwirkungen wie Erschütterungen, Verschiebungen, etc.
	Biologische Einwirkungen wie Pflanzenbewuchs, tierische Schädlinge oder Mikroorganismen

und Risse möglichst exakt erfassen. Dazu sind mindestens zwei bis drei Sondierungen mit anschließenden endoskopischen Untersuchungen je Untersuchungsbereich erforderlich. Für die Ermittlung von Festigkeitskenndaten sind mindestens drei Proben je Untersuchungsbereich und Untersuchungsart zu entnehmen (Abb. 6.30).

Neben den konkreten, aus den Untersuchungen gewonnenen Mauerwerkskenn- daten sind die auf das Mauerwerk wirkenden Beanspruchungen zu betrachten, welche in lastabhängige und lastunabhängige Einwirkungen gegliedert werden (Tab. 6.6).

Die komplexe Betrachtung aller Einwirkungskomponenten in Korrelation mit den festgestellten Schäden ermöglicht die Darstellung des Kräfteflusses und führt zu Erkenntnissen über die Hauptschadensursachen.

Die diagnostische Berechnung soll die Abschätzung der Restsicherheit aus dem Verhältnis der errechneten Druckspannung zu dem für das Mauerwerk zu erwartenden Bruchspannung ergeben. Die statische Berechnung beruht immer dann auf fehlerhaften, nicht der Realität entsprechenden Annahmen, wenn die ermittelte Druckspannung um ein Vielfaches höher als die Bruchspannung oder die Resultierende der beiden Kräfte außerhalb der Kernweite liegt. Die der Baustatik zur Verfügung

stehenden Mittel müssen der jeweils konkreten Situation angepasst werden, wobei hauptsächlich die Überlagerung verschiedener Einflussfaktoren beachtet werden muss. Schadensauslösend wirkt immer das Zusammenspiel mehrerer Einflüsse. Oftmals greift der in der Diagnosephase zu führende Standsicherheitsnachweis in die Phase der Instandsetzungsplanung ein. Ist der Vergleich der rechnerischen mit der Bruchspannung trotz eines plausiblen Rechenmodells nicht erfüllt, so muss eine geeignete Instandsetzungsmaßnahme geplant werden, welche die Tragfähigkeit der Konstruktion wiederherstellt (WTA-Merkblatt 1999).

6.8 Schalldämmung

Bei vielen Instandsetzungsmaßnahmen wird die Schalldämmung historischer Konstruktionen unbeachtet gelassen. Prinzipiell kann historische Bausubstanz nicht auf Neubaustandards getrimmt werden. Im einzelnen ist zu prüfen und gegebenenfalls mit den Bauordnungs- und Denkmalschutzämtern abzustimmen, wo von gängigen Richtlinien abgewichen werden darf.

Tragendes historisches Mauerwerk geht zumeist über alle Stockwerke bis zur letzten waagerechten Decke hinauf durch. Da es also nicht unterbrochen ist, würde es eigentlich den Schall ungehemmt durch das gesamte Gebäude leiten. Dem wirkt aber positiv entgegen, dass historisches Mauerwerk aufgrund seines hohen Gewichts schalldämmend wirkt. Sogar die Schallschutzanforderungen der DIN 4109 werden in der Tat häufig erfüllt.

Zur Erhöhung des Trittschallschutzes muss ein geeigneter Bodenaufbau und -belag gewählt werden. Dabei sollte unbedingt darauf geachtet werden, dass entweder die Deckenkonstruktion von Estrich und Belag oder die Trockenbauplatte unter der Decke von dieser abgekoppelt wird. Die Verkleidung von altem Mauerwerk mit Trockenbauplatten kann problematisch werden, es können Dröhneffekte und Schallumleitungen eintreten.

Beim Verlegen von Wasser- und Abwasserrohren oder Heizungsleitungen muss der Schallschutz besonders genau beachtet werden. Auch das Aufstellen von Bade- und Duschwannen muss schallgedämmt ausgeführt werden (Abb. 6.31).

6.9 Brandschutz

Die heutigen Landesbauordnungen räumen dem Brandschutz hohe Priorität ein. Sie klassifizieren zunächst die Gebäude und führen dann für jede Klassifikation gesonderte Anforderungen an den Brandschutz auf. Zum Schutz vor Feuer schreiben sie bei höheren Häusern z. B. die Anlage von Brandmauern, Fluchtwegen, Fluchttreppen und von Wärme- und Rauchabzugs-Einrichtungen vor. Längere Gebäude, natürlich auch instand zu setzende Altbauten, werden in Brandabschnitte eingeteilt. Sie verpflichten den Bauherrn, nur mit Baustoffen, die ein bestimmtes Brandver-

Abb. 6.31 Insbesondere beim Verlegen von Wasser- und Abwasserrohren im Altbau muss sorgfältig auf den Schallschutz geachtet werden



halten aufweisen, zu sanieren. Sie fordern von Bauteilen eine geprüfte Feuerwiderstandsdauer, und von Türen und Toren eine festgelegte Dichtheit.

Feuerwehrzufahrtswege werden ausgewiesen und müssen unbedingt frei gehalten werden. Nicht zuletzt die vorgeschriebenen Abstandsflächen vor einem Wohngebäude dienen auch dem Brandschutz. Bei Baudenkmälern können solche Feuerschutzanforderungen den Postulaten des Denkmalschutzes total widersprechen, es kann zum Konflikt zwischen den beiden Vorschriften kommen.

Zunächst gilt es, sich mit der „*Brandlast*“ im Dachgeschoss auseinander zu setzen. Darunter versteht man die Summe aller brennbaren Baustoffe und anderer Stoffe im Inneren eines Gebäudes. Aufenthaltsräume im Dachgeschoss enthalten stets eine Brandlast, Rettungswege, wie z. B. Treppenräume, dürfen selbstverständlich keine Brandlast enthalten. In der Regel kann die Brandlast der Räume nicht verändert werden, weil sie sich aus deren Nutzung ergibt. Für den vorbeugenden Brandschutz ist es daher erforderlich, die Art der verwendeten Baustoffe im Vorhinein festzulegen.

Die Klassifizierung des Brandverhaltens der Baustoffe erfolgt in Klassen. Nicht brennbare Baustoffe A1 (A bedeutet nicht brennbar, 1 bedeutet ohne besonderen Nachweis) – und A2 (Baustoffe mit geringen organischen Bestandteilen, die eine Prüfung gemäß DIN 4102 bestanden haben) – besitzen entweder gar keine oder so gut wie keine organische Bestandteile, z. B. Kohlenwasserstoffe, die entzündet werden können und das Brandgeschehen fördern. Solche Baustoffe sind beispielsweise Kies, Sand, Zement, Beton. Baustoffe, die ganz oder überwiegend aus organischen Stoffen bestehen, können sich bis zu einer Zündtemperatur erwärmen und verbinden sich dann unter Glut- und Flammenbildung mit dem Sauerstoff der Luft. Sie verbrennen also. Sie gehören zur Baustoffklasse B und werden nach DIN 4102 eingeteilt in: schwer entflammbare B1, normal entflammbare B2 und leicht entflammbare Baustoffe B3.

Die europaweit verbindliche Brandschutznormung lösen die gewohnten deutschen Kürzel und Bezeichnungen ab und gliedern die Kennzeichnung gemäß ein-

zelter Kriterien auf. So hat z. B. ein selbstschließender Feuerschutzabschluss, also eine Feuerschutztür in einem alten Mauerwerk mit der alten Kennzeichnung T 30, gemäß prEN 14 600 bzw. E DIN EN 13 501-2 die Europäische Klassifizierung EI₂30-C5 erhalten. Dabei steht E für Etanchéité = Raumabschluss, I₂ für Isolation = Wärmedämmung unter Brandeinwirkung, 30 für die Feuerwiderstandsdauer in Minuten, C für Closing = selbstschließende Eigenschaft.

Bei Dächern muss man zwischen dem Brandverhalten der Bedachung und der Feuerwiderstandsfähigkeit der Dachkonstruktion im Verbund mit den sie unterstützenden Bauteilen differenzieren. Bedachung im Sinne der DIN 4102-7 meint eine regensichere Dachhaut mit all ihren Dämmsschichten und Unterkonstruktionen, auf die von außen ein Brand einwirkt und die sich dabei als widerstandsfähig gegen Flugfeuer und strahlende Wärme erweist. Sie darf dann als „harte Bedachung“ bezeichnet werden. Die harte Bedachung soll den Brandüberschlag von einem Haus auf das benachbarte durch Funkenflug und strahlende Hitze verhindern. Dazu dienen auch die Brandwände.

6.9.1 Rettungswege

Auch die Zuwege für die Feuerwehrautos und die Fluchtwiege für die Bewohner müssen nach der Instandsetzung den aktuellen Vorschriften entsprechen.

Beim Aufbau eines weiteren Vollgeschosses auf einen Altbau muss darauf geachtet werden, dass ein zweiter, gesicherter Rettungsweg vorhanden ist oder die Wohnungen im Dachraum durch die Leitern der Feuerwehr sicher zu erreichen sind. Im Brandfall oder beim Auftreten anderer Gefahren können nur voneinander unabhängige Rettungswege für die Unversehrtheit der Bewohner sorgen. Unabhängig heißt, die zwei Rettungswege dürfen auf keinen Fall zusammengeführt werden und müssen beide unmittelbar ins Freie führen. Dies dient im Brandfalle sowohl den Feuerwehrmännern, sicher an den Brandherd zu gelangen, als auch den Bewohnern, sich unbeschädigt retten zu können. Besondere Bedeutung kommt diesem Prinzip beim Ausbau der zweiten Ebene des Dachgeschosses, dem Spitzbodenausbau, zu.

Für Emporen, Galerien und ähnliche Einbauten in Dachgeschosse sind zunächst die Anforderungen an die Feuerwiderstandsdauer der Wände, Decken und Dachschrägen zu beachten. Schließlich können für sie zusätzliche Rettungswege entbehrlich sein, wenn sie bestimmte Bedingungen erfüllen.

6.10 Blitzschutz

Bauliche Anlagen sind nicht immer gegen Blitzeinschlag schutzbedürftig. Wenn man jedoch das Mauerwerk sanieren will, muss immer geprüft werden, ob eine Blitzschutzanlage erforderlich wird. Dabei kommen besonders solche Gebäude in Betracht,

- die die Umgebung wesentlich überragen, wie Kirchtürme, Hochhäuser und hohe Schornsteine;
- die besonders brand- und explosionsgefährdet sind, wie Sägewerke, Mühlen, Lack- und Farbenfabriken, Lager von brennbaren Flüssigkeiten oder Gasbehälter;
- in denen wegen der Ansammlung von Menschen bei einem Blitzschlag mit einer Panik zu rechnen ist;
- die besonders brandgefährdet sind oder bei denen Kulturgüter geschützt werden sollen, wie einzeln stehende Gehöfte, Gebäude mit weicher Bedachung, Anlagen unter Denkmalschutz, Museen, Archive mit wertvollen Beständen.

Eine gute Blitzschutzanlage muss wie ein Faradayscher Käfig wirken: Ein Netz aus verzinkten Rundstählen, zumeist mit einem Durchmesser von 8 mm, untereinander gut verbunden, muss einen ausreichenden Querschnitt für die Erdung besitzen. Im Deutschen Museum in München ist eine vorbildliche Blitzschutzanlage im Modell aufgebaut. Die eindrucksvollen Vorführungen demonstrieren die große Energie, die ein Haus sofort in Flammen stehen ließe, wenn sie nicht durch die Drähte des Käfigs abgeleitet werden würde. Kein Punkt der Dachfläche soll wenigstens 10 m von einer Auffangleitung entfernt sein. Alle Metallteile eines Daches, wie z. B. Antennen, Schneefanggitter, Dachrinnen, Dunsthüte und Solaranlagen sollen an die Auffangleitung angeschlossen werden. Problematisch ist immer die Erdung. Da die Wasser-, Heiz- und elektrischen Leitungen im Gebäudeinneren ebenfalls der Erdung bedürfen, muss eine klare Trennung zwischen beiden Erdungen erfolgen, will man nicht gar die bei Blitzschlag freiwerdende Energie in das Haus hineinführen. Bei größeren Bauten sollte man einen Blitzschutzfachmann zuziehen.

6.11 Wärmedämmung

Die Anforderungen an den Wärmeschutz sind in den vergangenen Jahren im Zuge der Reduzierung des CO₂ – Ausstoßes immer mehr verschärft worden. Die immer wieder veränderten Wärmeschutz- und Energieeinsparungsverordnungen haben die Anforderungen sukzessive in die Höhe geschraubt. Die Bestimmungen gelten auch für bestehende und historische Gebäude, sofern Veränderungen an den Außenbau- teilen vorgenommen werden.

Die am 1. Oktober 2009 in Kraft getretene Energieeinsparungsverordnung EnEV 2009 gewährt sowohl für unter Denkmalschutz stehende Außenmauern als auch für Fachwerkwände großzügige Ausnahmen.

6.11.1 Wärmedurchgangskoeffizient U

Die EnEV 2009 kennt beim Ersatz oder bei der Erneuerung von Bauteilen neue, verschärzte, maximale U-Werte = U_{max}. Die Verschärfung der Höchstwerte der Wär-

Tab. 6.7 Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten bei erstmaligem Einbau, Ersatz und Erneuerung von Bauteilen nach EnEV 2009

Zeile	Bauteil	Maßnahme nach	Wohngebäude und Zonen von Nichtwohngebäuden mit Innen-temperaturen $\geq 19^{\circ}\text{C}$	Zonen von Nicht-wohngebäuden mit Innentemperaturen von 12°C bis $<19^{\circ}\text{C}$
			Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten U_{\max}	
1	2	3	4	
1	Außenwände	Nr. 1a bis d	0,24 W/(m ² K)	0,35 W/(m ² K)
2a	Außen liegende Fenster, Fenstertüren	Nr. 2a und b	1,30 W/(m ² K)	1,90 W/(m ² K)
2b	Dachflächenfenster	Nr. 2a und b	1,40 W/(m ² K)	1,90 W/(m ² K)
2c	Verglasungen	Nr. 2c	1,10 W/(m ² K)	Keine Anforderungen
2d	Vorhangfassaden	Nr. 6 Satz 1 Buchstabe a	1,40 W/(m ² K)	1,90 W/(m ² K)
2e	Vorhangfassaden	Nr. 6 Satz 1 Buchstabe b	1,90 W/(m ² K)	Keine Anforderungen
2f	Glasdächer	Nr. 2a und c	2,00 W/(m ² K)	2,70 W/(m ² K)
3a	Außen liegende Fenster, Fenstertüren, Dachflächenfenster mit Sonderverglasungen	Nr. 2a und b	2,00 W/(m ² K)	2,80 W/(m ² K)
3b	Sonderverglasungen	Nr. 2c	1,60 W/(m ² K)	Keine Anforderungen
3c	Vorhangfassaden mit Sonderverglasungen	Nr. 6 Satz 2	2,30 W/(m ² K)	3,00 W/(m ² K)
4a	Decken, Dächer und Dachschrägen	Nr. 4.1	0,24 W/(m ² K)	0,35 W/(m ² K)
4b	Flachdächer	Nr. 4.2	0,20 W/(m ² K)	0,35 W/(m ² K)
5a	Decken und Wände gegen unbeheizte Räume oder Erdreich	Nr. 5a, b, d und e	0,30 W/(m ² K)	Keine Anforderungen
5b	Fußbodenaufläufen	Nr. 5c	0,50 W/(m ² K)	Keine Anforderungen
5c	Decken nach unten an Außenluft	Nr. 5a bis e	0,24 W/(m ² K)	0,35 W/(m ² K)

medurchgangskoeffizienten U_{\max} in der EnEV 2009 ist in der Tab. 1 (hier Tab. 6.7) in fünf Bauteilgruppen geregelt.

Die EnEV 2009 erzwingt in der Regel für Außenwände von Wohngebäuden ein $U_{\max}=0,24 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Sie erleichtert allerdings in Anlage 3, Abschn. 1.6, die Anforderungen an die Wärmedämmung. Insbesondere bei Innendämmung an allen Außenwänden und an Fachwerkaußenwänden werden die U-Werte stark reduziert: bei Innendämmung an allen Außenwänden auf $0,35 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ und bei Fachwerkwänden auf $0,84 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$. Auch immer dann, wenn der Einbau von Wärmedämmung technisch begrenzt ist, darf der U-Wert geringer sein. Die Anforderungen gelten dann als erfüllt, „wenn die nach der anerkannten Regel der Technik höchst-

mögliche Dämmschichtdicke bei einem Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 0,040 \text{ W/(m K)}$ eingebaut wird.“

Die Wärmeleitfähigkeit von altem, verputztem Mauerwerk kann grob mit $\lambda_R \approx 1,0 \text{ W/m K}$ angegeben werden, unverputztes Mauerwerk aus Hochlochziegeln besitzt eine Wärmeleitfähigkeit $\lambda_R \approx 0,81 \text{ W/m K}$. Mit dem erstgenannten Wert ergibt sich für eine etwa 1,0 m dicke, unverputzte Außenwand ein Wärmedurchgangskoeffizient U von etwa $0,80 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$, mit dem die Anforderungen der EnEV 2009 vom 1. Oktober 2009 mit einem $U_{\max} = 0,24 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ (EnEV 2009 Anlage 3, Tab. 1, hier Tab. 6.7) für Außenmauern bei weitem nicht erreicht werden. Deshalb ist es sinnvoll, auch solch dicke Mauern mit einer zusätzlichen Wärmedämmung am besten außen, aber durchaus auch von innen zu verkleiden. Dieses Vorgehen sollte jedoch sorgfältig aus denkmalpflegerischer, aber vor allem auch aus bauphysikalischer Sicht geprüft werden. Daneben muss selbstverständlich der Einfluss des Nutzerverhaltens und der Heizungsinstallation auf die historischen Außenwände mit den Dämmmaßnahmen abgestimmt werden.

Mit Hilfe der hygrothermischen Simulation lässt sich der Tauwasseranfall sowohl an der Oberfläche des Mauerwerks als auch in seinem Inneren sehr genau bestimmen. Es muss immer dafür gesorgt werden, dass der Anfall von Tauwasser vermieden wird (Künzel et al. 2006).

6.12 Bewertung der Untersuchungsergebnisse

Das Ziel eines Sanierungsgutachtens kann nicht bloß der festgestellte Schadensumfang sein, sondern muss primär die schadensauslösenden Ursachen ermitteln. Die Ergebnisse aller Untersuchungen müssen selbstverständlich exakt dokumentiert sein und in Bestandspläne eingetragen und kartiert werden. Die Folgerungen aus den ermittelten Schadensursachen müssen sich auf nachvollziehbaren, fachmännischen Bewertungen der Untersuchungsergebnisse stützen. Das Zusammenspiel aller Kenngrößen gibt einen realistischen Überblick über Art, Ausmaß und Ursachen der Schäden.

Auf der Basis solcher exakten, hier vorgestellten Schadenskartierungen, die durchaus jeden geschädigten Stein einzeln erfassen können, werden Sanierungsempfehlungen gegeben und Instandsetzungspläne ausgearbeitet. Grundsätzlich müssen die empfohlenen Instandsetzungsmaßnahmen sorgfältig dahingehend abgewogen werden, ob sie sich für das individuelle Mauerwerk eignen. Dies setzt eine konkrete gutachterliche Festlegung darüber voraus, welche Sanierungsmaßnahme für das in Frage stehende Objekt zwingend notwendig, substanzsichend und kostengünstig ist. Den Maßstab für die Wirtschaftlichkeit bilden niemals allein die direkte Kosteneinsparung, sondern immer auch die eventuellen Folgekosten im Falle einer nicht gelungenen, also unzureichenden oder gar falschen Sanierung.

Auch die gewünschten neuen Nutzungsansprüche an das historische Mauerwerk müssen vor jeder Instandsetzungsmaßnahme hinterfragt werden, ob die alten Bausubstanz nach erfolgter Sanierung sie zu erfüllen in der Lage ist. Oft stellt sich näm-

Tab. 6.8 Kosten der Untersuchungsmaßnahmen

Einzelgework	Kosten
<i>1. Analytisches, verformungsgerechtes Aufmaß</i>	
Analytisches, wirklichkeitsgetreues Aufmaß M 1:50 Genauigkeitsstufe III	ca. 2,50 € pro m ² zu messende Fläche
Besondere Schwierigkeiten im Detail M 1:20 oder M 1:10 Genauigkeitsstufe IV	Bis zu 40,00 € pro m ² zu messende Fläche
Grundriss M 1:50	Bis zu 15,00 €/pro m ²
Bemaßung je nach Umfang und Schwierigkeit	5–15 % der Aufmaßkosten
Baubeschreibung und Fotodokumentation je nach Umfang und Schwierigkeit	10–30 % der Aufmaßkosten
<i>2. Anamnese</i>	
Erstellen eines Verzeichnisses historischer Quellen bei einfachen Gebäuden	Bis zu 5.000,00 €
Erstellen eines Verzeichnisses historischer Quellen bei gut überlieferten Gebäuden	Bis zu 8.000,00 €
Transkription von Quellentexten aus der Kanzleischrift in Maschinenschrift	Bis zu 3.000,00 € pro Archivale
Auswertung aller historischen Pläne, Schrift- und Bildquellen	Bis zu 10.000,00 €
<i>3. Restauratorische Untersuchung</i>	
Nach Tagen	Bis zu 500,00 €/Tag
Nach Befundschnitten (ca. 2 Schnitte/Tag) (saubere streifenförmig abgetreppte Ausführung)	Bis zu 250,00 €/Schnitt
Dokumentation der Befunde	Nach Stundenaufwand
<i>4. Fotogrammetrie</i>	
Pro Fassade bzw. Innenwand (Wandabwicklung)	Bis zu 2.000,00 €
Bei mehreren gleichartigen Fassaden	Nachlass pro Fassade ca. 30 %
Dreidimensionale Erfassung von Details wie Gesimse, Verblendarchitektur, Verdachungen, Gewände, etc.	Bis 350,00 €/Std.
Fotomaterial und Auswertung	Nach Bedarf und Stundenaufwand
<i>5. Endoskopie</i>	
Endoskopische Hohlraumuntersuchung einschließlich Schadensdokumentation, bis zu 5 Einzeluntersuchungen am gleichen Objekt	Pauschal 500,00 €
Jeder weitere Endoskopie	ca. 75,00 €
<i>6. Feuchtetechnische Untersuchung</i>	
Feuchtigkeitsmessung vor Ort mit Handgerät (CM-Gerät) einschl. Probeentnahme	30,00 €/Probe
Feuchtigkeitsmessung im Labor (Darr-Methode) einschl. Probeentnahme	66,00 €/Probe
Feststellung der hygroskopischen Wasseraufnahmefähigkeit bei 97 und 52 % relativer Luftfeuchte	ca. 55,00 €/Probe
Wassereindringversuch nach Karsten am Objekt bis zu 5 Versuchen	150,00 €
Jede weitere Untersuchung	ca. 20,00 €
Quantitative Feststellung einer flächigen Durchfeuchtung und des Feuchteverlaufs durch Thermographie Grundpreis	ca. 1.500,00 €

Tab. 6.8 (Fortsetzung)

Einzelgewerk	Kosten
Zuzüglich je Stunde	125,00 €/Std.
Untersuchung von Zimmerwänden mit einer Infrarotkamera	50,00 €/Wand
Komplette Untersuchung für ein Wohnhaus bei durchschnittlichen Feuchteerscheinungen	ca. 3.000,00 €
Kontrolluntersuchungen nach Trockenlegungsmaßnahmen, Überprüfung ihrer Wirksamkeit	ca. 2.000,00 €
<i>7. Probenahme</i>	
Oberflächenproben, bis zu 5 Proben pauschal	ca. 75,00 €
Jede weitere Probe	15,00 €
Kernbohrung, d=50–80 mm, mit dem Diamantbohrer, trocken, bis max. t=250 mm je Bohrung	100,00 €
Größere Bohrtiefen je cm	10,00 €
Kernbohrungen mit Hartmetallbohrkrone bis t=250 mm nur Ziegel und weicher Naturstein, je Bohrung	75,00 €
Bohrmehlentnahme mit Spiralbohrer bis t=200 mm, je Bohrung	30,00 €
Größere Bohrtiefen je 5 cm	3,00 €
Nassbohrung, d=100 mm, t=bis 150 mm	150,00 €
Nassbohrung, d=80 mm, t=bis 150 mm	130,00 €
Auswertung von Bohrkernen, Ermittlung von Kennwerten, Salzgehalt, etc.	Bis zu 80,00 €/Bohrkern
Salzbilanz für ein komplettes Wohnhaus	Bis zu 6.000,00 €
<i>8. Raumklimatische Untersuchungen</i>	
Klimadauermessung mit Vielfachschreiber, Installation der Anlage, Grundpreis	1.000,00 €
Zuzüglich jede weitere Messstelle=Fühlerinstallation	100,00 €
Standzeit der Anlage, Grundpreis	1.800,00 €
Zuzüglich Aufzeichnungsgerät je Monat	1.500,00 €
Messstelle je Monat	10,00 €/Messstelle

lich nach der Untersuchung heraus, dass das Mauerwerk in dem Gebäude gerade bei der ihm zugeschriebenen neuen Nutzung vollkommen überfordert ist. Beispielsweise stellte der Verfasser nach Abschluss seiner Mauerwerksdiagnose an der „*Kutschremise*“ in der Altstadt von Bamberg fest, dass dieses Gebäude auf keinen Fall für eine Büro- oder Wohnnutzung geeignet ist und schon gar nicht für die ursprünglich vorgesehene Nutzung als Mensa. Darum musste er dem Bauherrn (Staatl. Hochbauamt Bamberg) empfehlen, das Gebäude allenfalls als Räumlichkeit für die studentische Fahrradunterbringung auszuweisen. Würde der Bauherr dieses Ergebnis negieren, müssten beträchtliche zusätzliche Verstärkungen in das Mauerwerk eingebaut werden, die eine solche Instandsetzungsmaßnahme selbstverständlich erheblich verteuern. Wiederum muss die Kosten-Nutzen-Relation überprüft werden. Dem Rat des Verfassers wurde schließlich gefolgt (Maier 1991).

6.13 Untersuchungskosten

Die Kosten einer Untersuchung am Mauerwerk sind stets unter dem Blickwinkel des zu erwartenden Nutzens der aus ihnen gewonnenen Erkenntnis zu betrachten. Der Einsatz von aufwendigen Untersuchungsmethoden kann durchaus wirtschaftlich unsinnig sein, wenn die zu erwartenden Befunde die bereits gesicherten Erkenntnisse über das Mauerwerk nicht wesentlich verbessern. Der untersuchende Ingenieur muss sich also bewusst sein, dass immer nur ein paar wenige, im individuellen Fall sinnvolle Untersuchungsmethoden durchaus genügen, um eine erfolgversprechende Instandsetzungsmethode zu finden.

Oft scheuen die Bauherren die Mauerwerksdiagnose, weil sie sehr hohe Kosten befürchten. Diese Furcht kann ihnen genommen werden, wenn sie erfahren, dass die für ihr Mauerwerk erforderlichen Untersuchungen zumeist nur etwa 5 % der Instandsetzungskosten umfassen, während ein Sanierungsfehler, der wegen unternommener Untersuchung entstand, erheblich mehr Folgekosten nach sich zieht.

In unserer Tab. 6.8 hat der Verfasser die Erfahrungswerte hinsichtlich der Kosten für Untersuchungsmaßnahmen am historischen Mauerwerk zusammengestellt, wie sie sich in seiner Praxis herausgestellt haben.

Die hier angegebenen Kosten von Untersuchungsmaßnahmen weichen selbstverständlich je nach regionalen Bedingungen von den durch eine Ausschreibung erzielten, tatsächlichen Kosten und Preisen im Einzelfalle erheblich ab. Dennoch kann mit den hier angegebenen Kosten in der Regel eine einigermaßen zuverlässige Kostenschätzung einer Mauerwerksdiagnose durchgeführt werden.

Nirgendwo scheint die Scharlatanerie und Geschäftemacherei ein ertragreicheres Betätigungsgebiet zu besitzen als bei der Instandsetzung von Mauerwerk. Was wurde seit vielen Jahrzehnten den Hausbesitzern nicht schon alles angedreht: Belüftungsröhrchen nach Knapen, Kunststoffröhren als Mauerlunge (Abb. 7.1), Umluftkanäle verschiedenster Bauart, Kosmospappe-Verfahren mit bituminisierten, profilierten Wellpappen, Sperrputze auf Zementbasis, Verfliesen der Sockelzonen oder ganzer Erdgeschosswände (Abb. 7.2), Luftschächte oder -kanäle vor der Wand, thermische Sanierung durch Beheizen der Wandflächen, Bohrlochinjektionen mit Wasserglas- und Bitumenlösungen als drucklose und unter Druck ausgeführte Infusion, passive elektrophysikalische Verfahren z. B. nach Ernst/Traber, Entstrahlungsgeräte, Mauerentfeuchtung durch drahtlose Elektroosmose oder Magnetokinese und andere elektrische Zauberkästchen aller Art. Ganze Straßenzüge in unseren Städten und Dörfern künden noch heute vom großen Verkaufserfolg dieser Branche. Dabei kann festgestellt werden, dass diese Verfahren entweder wenig erfolgreich oder völlig nutzlos sind. Im Gegenteil, sie haben sich manchmal auch als schädlich erwiesen, da z. B. in den Hohlräumen der Belüftungsröhrchen sich zumeist ein Mikroklima entwickelt, welches zusätzliches Kondenswasser bildet und folgerichtig die Durchfeuchtung der Mauer erhöht (Arendt 1994).

7.1 Trockenlegung feuchten Mauerwerks

Die Instandsetzungsmaßnahmen an durchfeuchtetem und zugleich damit zumeist versalztem, historischem Mauerwerk lassen sich in Maßnahmen zur nachträglichen horizontalen und vertikalen Absperrung von Wasser, Entsalzungs- sowie in Drainagemaßnahmen zusammenfassen. In der Regel sollen damit zwei Instandsetzungsziele erreicht werden: die Trockenlegung, also die Minderung des nach oben gerichteten kapillaren Feuchttetransports, und die Entsalzung des Mauerwerks durch Minderung oder Ausschluss vertikaler Salztransporte im Mauerwerk. Außerdem soll eine fortschreitende Salzanreicherung in den Verdunstungszonen, vor allem im Mauerwerkssockel, verhindert werden.

Abb. 7.1 Die Mauerlunge findet man jetzt nur noch selten in Altbauwänden. Einst wurde sie aber flächendeckend in den Altbauarealen eingesetzt, bis man ihre Nutzlosigkeit, ja sogar ihre Schädlichkeit erkannte



Abb. 7.2 Das Verfliesen der Haussockel führt zu Schäden oberhalb des Sockels



Die Anforderungen an den Grad der Abdichtungswirkung sind von zwei Parametern abhängig: zum einen von dem zu erwartenden Salznachschub, zum anderen von der Nutzung des Bauwerks, zu dem das Mauerwerk als integraler Bestandteil gehört. Das Restsaugverhalten des Mauerwerks und der Salzgehalt kapillar eingewanderter Feuchtigkeit soll nach der Abdichtungsmaßnahme nicht mehr hoch, sondern niedrig sein. Die Wertigkeit der Nutzung des Gebäudes sowie seiner Teile dagegen soll gesteigert werden.

Wissenschaftlich abgesicherte und nachweislich wirksame Verfahren zur Trockenlegung kapillar durchfeuchteten Mauerwerks aus Natur- oder Backsteinen lassen sich in nur drei Gruppen zusammenfassen: in die mechanischen, chemischen und elektrophysikalischen Verfahren. Unumstritten bewährt haben sich seit alters die mechanischen Trockenlegungsverfahren, wobei diese allerdings immer mit mehr oder weniger umfangreichen Substanzverlusten einhergehen. Bei sehr de-solaten Wänden muss zum Mauerwerksaustausch gegriffen werden, der in jedem

Falle den totalen Verlust des originalen Mauerwerks bedeutet. Vor allem in den letzten Jahrzehnten, etwa seit 50 Jahren, erwies allerdings nicht ganz umstritten die Injektion ihre Tauglichkeit. Dabei bildet ein in den Mauerwerksquerschnitt eingebrachtes Injektionsmittel eine kapillarbrechende Schicht im Porengefüge des Mauerwerks und unterbindet auf diese Weise das Aufsteigen der Feuchte. Doch dies gelingt nicht immer absolut fehlerfrei und muss deshalb im Nachhinein genau kontrolliert werden. Die dritte Gruppe, welche die elektrophysikalischen Verfahren bilden, ist jedoch aus wissenschaftlicher wie aus praktischer Sicht nach wie vor sehr umstritten und muss mit großer Vorsicht detailliert betrachtet werden, weil die meisten dieser Verfahren bislang versagt haben. Gerade sie versprechen häufig außerdem noch eine mit der Trockenlegung einhergehende Entsalzung: eine hohe Erwartung wird geweckt und umso größer ist in aller Regel die Enttäuschung beim Misslingen. Oftmals sind alle diese aufwendigen Maßnahmen schlicht überflüssig, denn es genügt manchmal allein der bloße Einbau einer wirksamen Dränage verbunden mit einer vertikalen Abdichtung, um die Trocknung des Mauerwerks dauerhaft sicher zu stellen.

7.1.1 Nachträgliche Horizontalabdichtung

Beobachtet man im Sockelbereich eines Mauerwerks feuchte, dunkle Zonen mit mäandrierenden Rändern zusammen mit weißlich-grauen Salzausblühungen, sollte zunächst mit Hilfe der im letzten Kapitel dargestellten Untersuchungsmethoden eine Feuchtebilanz und damit einhergehend eine Salzbilanz erstellt werden. Nur so kann der Fachplaner sicher sein, dass es sich um aufsteigende Feuchtigkeit aufgrund der kapillaren Wirkung im mineralischen Wandbaustoff handelt (Abb. 7.3).

Wenn die Feuchteuntersuchung eine Durchfeuchtung des Mauerwerks durch in den Baustoffkapillaren aufsteigende Feuchtigkeit ergibt, müssen die kapillaren Wirkungsmechanismen mit Hilfe von eingebauten Schichten zur nachträglichen Horizontalabdichtung unterbrochen werden, um die gewünschte Trockenlegung zu erreichen.

Die Auswahl eines bestimmten Verfahrens zur nachträglichen Abdichtung kann nur als Ergebnis einer genauen und sorgfältigen Überprüfung des individuell anstehenden Mauerwerks und seines Baumaterials richtig getroffen werden. Weicher Backstein verlangt andere Verfahren zur Abdichtung als harter Granit. Auch der an Ort und Stelle bestimmte Durchfeuchtungsgrad muss die Wahl des Trockenlegungsverfahrens beeinflussen: Hohe Feuchtwerte im Mauerwerk, z. B. ein Durchfeuchtungsgrad von mehr als 50 %, werden mit ziemlicher Sicherheit zu Schwierigkeiten beim Auf trennen mit diversen Sägen führen. Auch die Aufnahmefähigkeit für Injektionsmittel kann durch mit Wasser gefüllte Materialporen verringert bis aufgehoben werden (Arendt und Seele 1999).

Außerdem müssen statische Belange beachtet werden: Immer dann, wenn Horizontalkräfte im Mauerwerk wirken, etwa an einem Gewölbefuß oder infolge anstehenden Erdreichs, müssen die Schubkräfte berücksichtigt werden. Oft ist dann ein Mauertrennverfahren von vornherein ausgeschlossen, weil dafür der Abstützungs-

A 2196 / 2009
Anlage 1
Seite 2 / 2

Bohrkern Nr.	1.1	1.2	1.3
Höhe über OKF [m]	+ 0,3	+ 1,0	+ 1,8
Originalfeuchte [Masse-%]	13,4	9,6	5,0
Wasseraufnahmevermögen [Masse-%]	13,2	8,6	12,0
Durchfeuchtungsgrad [%]	> 100	> 100	41,7

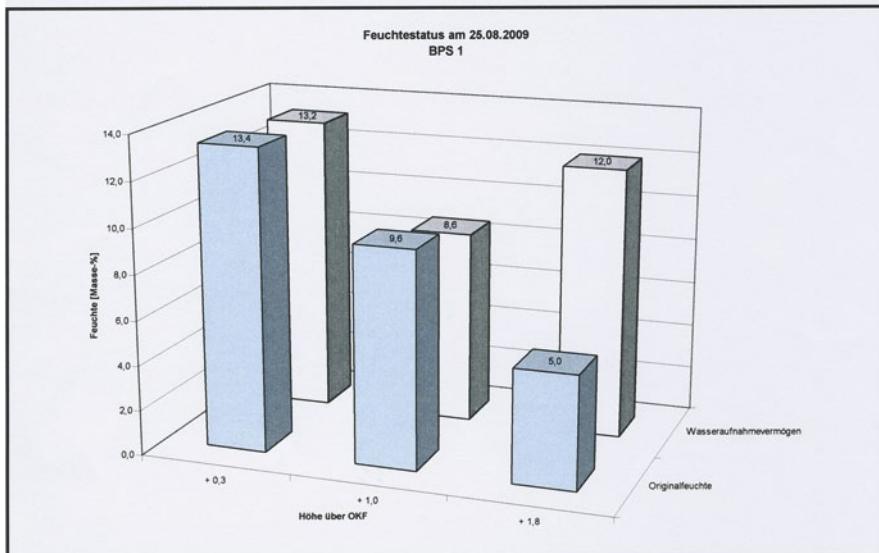


Abb. 7.3 Auswertung der Beprobungsstelle BPS1, entsprechend dem Höhenprofil Abb. 6.27

aufwand wesentlich zu hoch und damit zu teuer wäre. Kurzum – bereits bei der Auswahl des anzuwendenden Verfahrens müssen Ergebnisse einer gründlichen und alle wesentlichen Parameter umfassenden Untersuchung vorliegen.

7.1.1.1 Mechanische Verfahren

In der baulichen Praxis haben sich mechanische Verfahren zur nachträglichen Horizontalabdichtung sog. „*Mauertrennverfahren*“ wie Bohr-, Ramm- und Sägeverfahren, sowie bei einer festgestellten, weitgehenden Verrottung des Baumaterials der komplette Mauerwerksaustausch mehr oder minder gut bewährt und sind heute umstritten. Dazu kommt zumeist die Mauerwerks- bzw. Fundamentunterfangung

nach DIN 4123. Seit einigen Jahren wird an der Entwicklung eines Verfahrens gearbeitet, das Mauerwerk durch einen Hochdruck-Wasserstrahl trennt. Wegen des hohen Wassereintrags und den Sicherheitsproblemen, die aus der Verwendung hoher Drücke resultieren, hat dieses Verfahren bislang weder Marktreife erfahren noch baupraktische Bedeutung erlangt. Selbstverständlich dürfen alle diese Verfahren miteinander kombiniert werden, so dass Austausch, Unterfangung und Sägeschnitte an ein und demselben Mauerwerk angewendet werden können. Allesamt sind sie allerdings allein schon wegen der erforderlichen stabilen Abstützungen immer sehr aufwendig und deshalb entsprechend teuer. Sowohl Ramm- und Sägeverfahren als auch Mauerwerksaustausch und Unterfangung sind im Kellerbereich zumeist schwierig anzuwenden, weil dort ausreichend tiefe Baugruben ausgehoben oder zumindest ausreichend breite Arbeitsräume geschaffen werden müssen.

Die Industrie stellt für alle mechanische Verfahren eine Auswahl von Abdichtungsstoffen zur Verfügung. Unterschieden wird dabei zwischen Vergussmassen, flexiblen Dichtungsbahnen und starren Platten. Bei den Vergussmassen handelt es sich zumeist um mit Zement gebundenen Beton nach DIN 1045, sog. „*Instandsetzungsbeton*“, wie er im Regelfall bei der Sanierung von Betonbauwerken eingesetzt wird (Scholz und Knoblauch 1999). Weil sich bei solchen Betonen wegen ihres Schwindverhaltens Zugspannungen aufbauen, wird man besser auf kunststoffmodifizierten Zementmörtel, sog. „*Polymer-cement-concrete*“ PCC, übergehen. Auch dieser sollte natürlich möglichst schwindarm sein und einen niedrigen E-Modul besitzen. Zementmörtel/PCC sind insbesondere wegen ihrer schwind- und schrumpffreien Aushärtung, ihrer sehr hohen chemischen Widerstandsfähigkeit und deshalb, weil bei ihnen keine Nachbehandlung erforderlich ist, als Abdichtungsstoffe sehr geeignet. Außerdem sind sie gegenüber kapillar wandernder Feuchte absolut dicht, hoch sulfatbeständig und entwickeln bei guter Verarbeitbarkeit ihre Festigkeit sehr schnell. Sie werden am besten mit dünnen Verpresslanzen in die Trennfuge eingebracht. Die Lanze wird in der Fuge durch das Mauerwerk hindurch geschoben und beim langsamen Zurückziehen tritt das Verpressgut aus.

Des weiteren gibt es zu Abdichtungszwecken bituminöse Dichtungsbahnen gemäß DIN 18 190 mit Rohfilz-, Glasfasergewebe-, Metallband- oder Polyethylen-terephthalat- PET – einlagen. Wird, z. B. aus Denkmalschutzgründen, Kalkmörtel für die Verpressung der Abdichtungsschicht, die aus einer Bitumenbahn mit einer Aluminiumeinlage besteht, verwendet, wird bei der geringsten Verletzung der Bitumenschicht die Aluminiumfolie angegriffen und korrodiert. PET wird zu klaren, äußerst reißfesten, hoch kälte- und wärmebeständigen Dichtungsbahnen nach DIN 18 190, Teil 4, verarbeitet.

Auch die Gruppe der Kunststofffolien nach DIN 18 195, Teil 2 und der Kunststoffplatten hat sich in der Praxis besonders geeignet gezeigt. Darunter fallen Folien aus Polyisobutylen PIB, Polyvinylchlorid PVC – weich, Ethylenepolymerisat – Bitumen ECB und glasfaserverstärkte Polyesterharzplatten GFUP.

Außerdem werden häufig Metalleinlagen wie Edelstahl-Wellplatten aus ferritischem Chromstahl (Werkstoff-Nr. 1.4016/DIN 17 007) für Abdichtungen in Mauerwerk ohne nennenswerte Chloridbelastung und austenitischer, ungewellter, mit Noppen bestückter Chrom-Nickel-Molybdänstahl (Werkstoff-Nr. 1.4401/DIN 17 007)

Abb. 7.4 Mauersägeschnitt mit Einbau einer bituminierten Folie



in solchem mit mittlerer bis hoher Chloridbelastung eingesetzt. Schließlich hat sich Walzblei ebenfalls als brauchbar erwiesen. Für die Metallbandeinlagen haben sich Kupfer- und Walzbleiplatten wegen ihrer hohen Korrosionsbeständigkeit bestens bewährt (Abb. 7.4).

Mauerwerksaustausch Das Mauerwerksaustauschverfahren bedeutet den totalen Verlust des originalen Mauerwerks. Es kann in aller Regel nur mit großer Behutsamkeit durchgeführt werden, indem Abschnitt für Abschnitt des durchfeuchteten und zugleich nicht mehr tragfähigen, verrotteten Mauerwerks gänzlich herausgenommen und durch neues ersetzt wird. Das Verfahren empfiehlt sich allerdings nur bei Wänden aus Natur- oder Backsteinen bis zu 1,20 m Wandstärke. Bei dickeren Mauern wird dieses Verfahren unwirtschaftlich, weil ein sehr hoher Abstützungsaufwand getrieben werden muss und weil die Arbeiten nur von Hand ohne Maschineneinsatz, also sehr teuer, auszuführen sind. Bevor der Austausch beginnen kann, muss also das vorhandene, aufgehende Mauerwerk mit wirksamen Abstützungen wie Holzbalken oder Stahlstützen unterfangen werden, um ein Setzen während des Austauschverfahrens zu unterbinden (Nadoushani 1992). Die Abstützungen müssen selbstverständlich von einem Tragwerksplaner so berechnet und gewählt werden, dass sich während der Austauscharbeiten insbesondere als Folge von horizontalen Schubkräften keine Risse im aufgehenden Mauerwerk bilden können. Dann wird zumeist mit Hilfe des Endoskops oder seltener durch Bohren von größeren Löchern untersucht, ob etwa in zweischaligem Mauerwerk eine lockere, unvermittelt herauszufallen drohende Füllschicht sitzt oder ob sich hinter dem auszutauschenden Mauerwerk Aufschüttmaterial oder lockeres Erdreich befindet, das beim Entfernen des alten Mauerwerks herabrieseln oder -rutschen kann. Ist dies der Fall, muss geprüft werden, ob dieses lockere Füllmaterial nicht zuerst einer Verfestigung durch Injizieren von geeigneten Zementmörteln oder Suspensionen unterzogen werden muss. Bei durchfeuchtem Mauerwerk steht selbstverständlich manchmal auch nasser Schlamm oder Erdreich hinten an, das beim Herausnehmen des Mauerwerks zu einem durchaus gefährlichen Wassereinbruch in die Baugrube führen kann. Deshalb muss während der Arbeiten stets eine entsprechende Wasserhaltung gewährleistet sein. Es kann auch hinter dem Mauerwerk ein nicht unterkellerter Bereich eines anstehenden Gebäudes liegen, der beispielsweise den Fußboden für Wohnräume trägt. Erst wenn sicher gestellt ist, dass bei der Herausnahme des Mauer-

Abb. 7.5 Aus dem mehrschaligen Mauerwerk der Schottersmühle fällt die lose Innenfüllung heraus



werks nicht ungewollt anderes Material zusammen damit herausfällt, kein Wasser herausströmt, der etwa dahinterliegende Fußboden ausreichend gesichert ist und keinesfalls sich senken oder gar einbrechen kann, sollte ein Mauerwerksaustausch begonnen werden (Abb. 7.5).

Zunächst wird nun die Mauerwerkslänge in kurze, etwa 1,0 m lange Abschnitte eingeteilt. Dabei ist darauf zu achten, dass der Mauerwerksverband nicht gestört wird, damit das neue Mauerwerk kraftschlüssig eingebunden werden kann. Außerdem muss die Standsicherheit des neuen Mauerwerks durch neue, tragfähige Fundamente sichergestellt werden. Dann wird jedes zweite Mauerwerkssegment vorsichtig heraus gestemmt. Der Austausch wird oft nur im Fundamentbereich ausgeführt, zumal wenn er in einem direkten Zusammenhang mit der Unterfangung nicht mehr tragfähigen Mauerwerks steht (Arendt und Seele 1999). Schwindvorgänge im neuen Mauermaterial lassen Haarrisse oder auch größere Risse entstehen. Deshalb ist die Dicke der Lagerfuge auf ein Minimum zu reduzieren und es ist zu überlegen, ob die herausgenommenen Mauerwerksabschnitte wegen der hohen Schwindrissegefahr nicht besser anschließend mit vergütetem, nicht schwindendem Beton ausbetoniert werden sollten. Erst wenn die neu eingebrachten Mauerwerksabschnitte abgebunden haben, können die stehen gebliebenen Zwischenabschnitte ebenfalls heraus gestemmt werden (Abb. 7.6).

Wenn das neue, abschnittsweise, standsicher eingebrachte Mauerwerk oberhalb des Geländes ansteht, muss es selbstverständlich aus dem gleichen oder einem ähnlichen Material bestehen wie das vorhanden gewesene. Die Anschlussfuge zwischen dem neuen und dem darüber befindlichen alten Mauerwerk muss gut mit Mauerbrocken ausgezwickt, verkeilt und mit Mörtel satt ausgeworfen werden. Die Verfugung und der Verband sollten an das alte Mauerwerk angepasst sein. Um nun die kapillarbrechende Wirkung zu erreichen, wird in der geforderten Höhe eine flexible Dichtungsbahn in das neue Mauerwerk eingelegt. Dazu dienen, wie oben bereits ausgeführt, reißfeste, bitumenbeschichtete Aluminium- oder Bleifolien, oder Kunststofffolien, die zunächst in den jeweiligen Mauerwerksabschnitt überhängend

Abb. 7.6 Abschnittsweiser Mauerwerksaustausch, Unterfangung mit Mauerwerk aus Kalksandsteinen



eingelegt und dann beim Austausch der stehen gebliebenen Mauerwerkssegmente einander wenigstens 20 cm überlappen. Diese die Kapillaren zuverlässig brechende Abdichtung gegen aufsteigende Feuchtigkeit schützt das oberhalb liegende Mauerwerk sicher vor Durchfeuchtung. Zuletzt werden die Abstützungsteile wie Stahlträger oder Holzbalken herausgenommen und die von ihnen benutzten Löcher im Mauerwerk sauber verschlossen.

Aus Kostengründen und wegen des dauerhaften Erhalts der Standsicherheit während der Maßnahme verzichtet man oftmals auf einen kompletten Mauerwerksaustausch und begnügt sich vor allem bei sehr dicken Mauern damit, nur die vordere, versalzene Mauerwerksschicht in einer Dicke von etwa 12–15 cm heraus zu stemmen und durch neues, haltbareres oder zumindest gleichartiges Mauermaterial zu ersetzen. Zur Erhöhung der Wärmedämmung kann zwischen der neuen Schale und dem alten Mauerwerk etwa von Wohngebäuden leicht eine entsprechende Wärmedämmsschicht eingebracht werden, die wie eine Kerndämmung eines zweischaligen Mauerwerks wirkt (Venzmer 2001). Auf diese Weise wird zugleich mit der Veränderung der Kapillaren die Zufuhr von Kondenswasser in den Sockelbereich hinein unterbunden. Zudem wird dabei das oberflächennahe, versalzene Material entfernt und durch ein frisches, oft wesentlich geeigneteres Baumaterial ersetzt. Diese Vorgehensweise wird allerdings nur dann funktionieren, wenn zugleich damit die weitere Zufuhr von Wasser in das Mauerwerk hinein nachhaltig unterbunden wurde.

Dieses Verfahren zur Instandsetzung des Gebäudesockels, wenn auch ohne zusätzliche Wärmedämmung, hat sich z. B. an der St. Gumbertuskirche in Ansbach/Mfr. bewährt, wo vor ca. 20 Jahren eine neue Granitschale anstelle der alten vor den Backsteinsockel geblendet worden ist (Abb. 7.7).

Auch dem Sockel aus sehr weichem Oberdachstettener Schilfsandstein an der Kirche in Oberdachstetten/Mfr. wurde vor ca. 25 Jahren eine Schale aus härterem Quarzsandstein vorgesetzt (Abb. 7.8).

Als drittes Beispiel sei die Pfarrkirche in Iphofen/Ufr. genannt, bei der vor etwa zwanzig Jahren neue Sandsteinplatten anstelle der versalzenen vorderen Steinschicht der Erdgeschossmauern eingesetzt wurden (Abb. 7.9).

Abb. 7.7 St. Gumbertuskirche, Ansbach. Vor das Backsteinmauerwerk des Sockels wurden starke Granitplatten gesetzt



Abb. 7.8 Oberdachstetten, Pfarrkirche. Der vor die Sockelmauer geblendetete Sandstein hat die Salzlast auf Dauer nicht verstecken können



Die Maßnahmen an der St. Gumbertuskirche in Anbach und an der Pfarrkirche in Iphofen haben sich seitdem bis heute gut bewährt, das sichtbare Mauerwerk ist in der Tat noch immer weitgehend schadensfrei. Bei allen drei Beispielen wurde damals übrigens auf eine Hydrophobierung oder einen schützenden Anstrich verzichtet. In Oberdachstetten hätte man freilich auch daran denken müssen, dass die in dem weichen Originalsandstein weiterhin ungebremst aufsteigende Feuchte die bauschädlichen Salze hinter der neuen harten Steinschale hinauf in die Kirchenschiffwand zu transportieren vermag. Da dies wegen fehlender Salzanalyse nicht erkannt wurde und daher unberücksichtigt blieb, begann inzwischen eine Versalzung oberhalb der ausgetauschten Mauerwerkszone.

Das anstelle des alten, neu eingebrachte Mauerwerk kann, wie schon gesagt, durch Salzbehandlung, Hydrophobierung oder durch Auftrag eines Sanierputzes bei

Abb. 7.9 Iphofen/Ufr., Pfarrkirche. Die versalzene alte Sandsteinplatten wurde abgestemmt und an ihre Stelle neue Sandsteinplatten versetzt



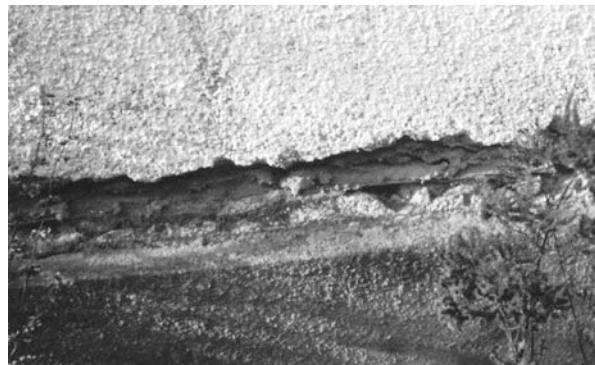
Bedarf ergänzt werden. Häufig hilft auch eine Festigung mit Kieselsäureethylester (Kap. 9).

Abgebrochene Profile am Natur- oder Backsteinmauerwerk lassen sich mit Steinersatzmassen recht gut reprofilieren. Auf diese ergänzenden Maßnahmen wird in Kap. 10 eingegangen werden.

Mauersägeverfahren Das Mauerwerk kann durch Aufstemmen, Aufschneiden oder Aufsägen derart aufgetrennt werden, dass ein Freiraum resp. ein freier Fugenraum bis max. 20 mm Schnitthöhe entsteht, in den entweder eine Kunststofffolie, eine Bitumenfolie, eine kunststoff- oder bitumenkaschierte Metallfolie oder ein Edelstahlblech eingeschoben werden kann (s. Abb. 7.4). Die bereits ausführlich aufgezeigte, verfügbare Palette an Abdichtungsmaterialien wie Bleche, Folien, aber auch vergütete Zement- oder kunststoffgebundene Mörtel unterbricht dann die Kapillaren des Mauerwerks und beendet wirksam das Aufsteigen der Feuchtigkeit. Natürlich muss darauf geachtet werden, dass die eingebrachten Dichtungssysteme selbst eine entsprechend lange Lebensdauer besitzen (Abb. 7.10).

Eine Übersicht über die Trennverfahren und die dabei eingesetzten Geräte soll in Tab. 7.1 gegeben werden. Aber die Übersicht allein genügt nicht, sondern für die Praxis soll auch ihre Tauglichkeit bewertet werden. Dabei stellen wir als Kriterien die robuste einfache Gerätetechnik, die Baustoff- bzw. Mauerwerkseignung, den

Abb. 7.10 In die aufgeschnittene Mauerfuge wurde eine Dichtungsbahn eingelegt



erforderlichen Arbeitsraum, die maximalen Mauerquerschnitte und ihre Dicke, die erzielte Schnitthöhe der Trennfuge, den Arbeitsfortschritt und die kontinuierliche Lastübertragung während des Verfahrens fest.

Bei Bruchsteinmauern haben sich folgende Sägeverfahren bewährt (Hettmann 1993/1994):

- das Seilsägeprinzip nach Haag,
- das V – Schnittverfahren mittels einer Trennscheibe nach Alfred Kunz,
- die Kettensäge auf Wandschienen,
- die Schwertkettensäge für bodenbündigen Schnitt bei Wanddicken bis zu 2,40 m,
- die Dreieckkettensäge für Sacklochschnitte,
- die Kettenbohrgeräte bei Wanddicken bis zu 4,50 m.

Der Erfolg all dieser Verfahren wird im wesentlichen durch eine korrekte handwerkliche Ausführung bestimmt.

Nach dem Auftrennen mit einer der genannten Sägen wird das Mauerwerk mit korrosionsbeständigen Keilen aufgekeilt und dann ein für mechanische Verfahren geeigneter, am Anfang dieses Kapitels genannter Abdichtungsstoff im Fortgang des Trennens eingeschoben. Dies muss natürlich völlig ohne Fehlstellen erfolgen. Freilich muss bekannt sein, dass keine Unverträglichkeit zwischen dem Verfüllmörtel und dem alten Mauerwerk besteht, z. B. wäre bei Mauerwerk aus Gipssteinen oder Gipsmörtel ein Zementverfüllmörtel äußerst schädlich, denn sein Einsatz würde zu unangenehmen Treiberscheinungen führen. Ein weiterer Problempunkt besteht im Aufkeilen: Wenn das Aufkeilen nicht sorgfältig genug geschieht, kann sich das Mauerwerk über dem Sägeschnitt setzen und reißt auf.

Um Verformungen des Mauerwerks während des Einbringens des Zementmörtels/PCC zu verhindern und weil bei beidseitigen waagerechten Einschnitten in der Wandmitte ein Versatz nicht zu vermeiden ist, der durch seine scharfe Kante die Dichtungsbahn punktförmig belastet und sie an dieser Kante entlang aufreißen lässt, hat die Firma Alfred Kunz GmbH sich eine andere, nicht waagerechte, sondern schräge Variante des Sägeverfahrens überlegt: das V – Schnittverfahren. Bei diesem Verfahren muss das Mauerwerk allerdings auf jeden Fall zwei Parameter erfüllen: es darf nicht allzu dick sein (max. 80 cm) und es muss von beiden Seiten

Tab. 7.1 Trenngeräte mit Darstellung ihrer besonderen Merkmale

Trenngeräte, Trennverfahren	Charakteristik	Bewertung ^a
Mauersäge	Robuste, einfache Gerätetechnik	①
	Nur für weiche Baustoffe geeignet (Kalkmörtelfugen, Backsteine)	⑥
	Nicht für größere Mauerdicken, nur bis 1,30 m	⑥
V-Schnitt mit der Trennscheibe	Robuste, einfache Gerätetechnik	①
	Wenig Arbeitsraum erforderlich	①
	Nur für relativ weiche Baustoffe geeignet	⑥
	Bis max. 80 cm Mauerdicke	⑥ ⑥
Schwert- bzw. Kettensäge mit Hartmetallschneidkörper	Relativ leichte, handwerksgerechte Geräte	①
	Sehr hoher Verschleiß an Trennscheiben	⑥
	Schnitttiefe bis ca. 90 cm	① ⑥
	Nur für weiche, nichtschmierende Baustoffe	⑥
Schwert- bzw. Kettensäge mit Diamantschneidkörper	Schnitthöhe ca. 14 mm	①
	Relativ leichte Geräte	①
	Hoher Verschleiß der Sägekette	⑥
	Schnitttiefe bis ca. 160 cm	① ①
Kreissäge	Nahezu alle Mauerwerksarten bearbeitbar	① ①
	Schnitthöhe ca. 20 mm	① ①
	Hoher Verschleiß der Sägekette	⑥
	Sehr aufwendige, schwere Technik	⑥ ⑥
	Schnitttiefe bis ca. 65 cm	⑥ ⑥
Seilsäge	Nahezu jedes Gestein trennbar	① ①
	Schnitthöhe ca. 8 mm	⑥
	Hoher Verschleiß des Sägeblattes bei kleinteiligen, harten Steinen	⑥
	Mittlerer bis hoher Geräteaufwand	⑥
	In Innenecken nicht einsetzbar	⑥
Kernbohrverfahren	Sehr große Schnitttiefen möglich	① ①
	Bewältigt auch komplizierte Mauerwerksgrundrisse	① ①
	An- und Umsetzen der Säge aufwendig	⑥
	Hoher Geräteaufwand	⑥
	Großer Arbeitsraum erforderlich	⑥
Rammverfahren	Auch für große Mauerdicken einsetzbar	①
	Nahezu jedes Gestein bearbeitbar	① ①
	Sehr aufwendig, da geringer Arbeitsfortschritt	⑥ ⑥
	Hoher Feuchtigkeitseintrag in das Mauerwerk	⑥ ⑥
	Kombination mit Vernadelung möglich	①
	Durchgängige Lagerfuge erforderlich	⑥
	Für Mauerdicken bis ca. 100 cm einsetzbar	① ⑥
	Keine Unterbrechung der Lastübertragung im Mauerwerk	①
	Nicht für erschütterungsempfindliches Mauerwerk	⑥
	Geringer bis mittlerer technischer Aufwand	①

^a Eigenschaften nach Prof. D. Hettmann ①=vorteilhaft ⑥=nachteilig, Verdoppelung=besonders vorteilhaft oder besonders nachteilig

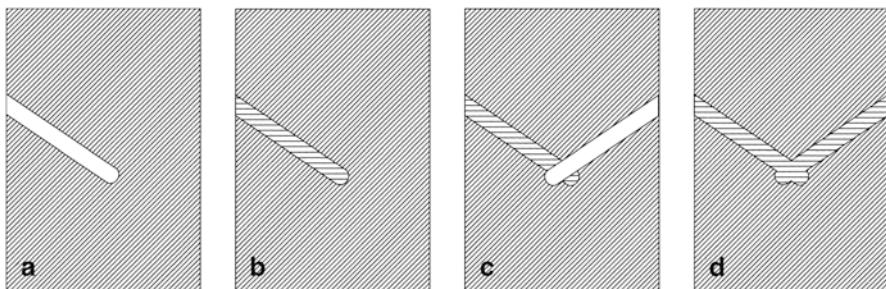


Abb. 7.11 V-Schnitt-Verfahren. **a** der 1. Schnitt wird schräg gesetzt. **b** er wird anschließend mit vergütetem Mörtel verfüllt. **c** der 2. Schnitt erfolgt von der gegenüberliegenden Mauerseite. **d** er wird ebenfalls sorgfältig verfüllt

her zugänglich sein. Dabei wird der Mauerwerksquerschnitt in zwei Arbeitsgängen nacheinander mit einer Trennscheibe abschnittsweise V – förmig aufgeschnitten. Zunächst wird in die eine Seite des Mauerwerks ein Schnitt in einer Neigung von ca. 45° eingebracht, der über dessen Mitte durchgehen muss. Bevor der zweite, ebenfalls schräge Schnitt von der gegenüberliegenden Seite aus erfolgen kann, wird der erste mit wasserdichtem Mörtel, z. B. einem vergüteten Zementmörtel/ PCC ausgegossen. Der zweite Schnitt muss auf jeden Fall den ersten überschneiden, sonst entstehen Lücken zwischen beiden Schnitten und die kapillarbrechende Schicht aus beiden, mit vergüteten Mörteln verfüllten Einschnitten ist nicht ohne Fehlstellen und daher wirkungslos. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass ein Setzen des Mauerwerks im Schnittstellbereich ausgeschlossen werden kann. Eine besondere Bedeutung erlangte dieses Verfahren allerdings nie, da die beidseitige Trennung selten uneingeschränkt möglich ist, was natürlich den Kostenvorteil zu nichte macht (Abb. 7.11).

Fast alle Sägen brauchen entsprechend viel Kühlflüssigkeit, um nicht heiß zu laufen. Deren Umweltverträglichkeit sollte unbedingt vor Beginn der Maßnahme festgestellt werden. Auch muss bei größerem Kühlwasseranfall für eine entsprechend umfangreiche Wasserhaltung mit Folienrinnen und Absetzbecken an der Baustelle gesorgt werden. Bedingt durch die hohe Geschwindigkeit der meisten Sägen wird das Wasser mit feinstem Schleifstaub mitgerissen und verschmutzt das Mauerwerk großflächig; außerdem tränkt es die große Wasserzugabe in weiten Bereichen. Jene zusätzlich eingebrachte Nässe aktiviert weitere bauschädliche, bislang unverändert gebliebene Salze in diesem eingenässten Umfeld des Trennbereiches. Dies wird bei sehr stark salzbelastetem Mauerwerk mit großer Sicherheit zu schlimmen Folgeschäden führen. Inzwischen gibt es jedoch Seilsäge-Trennverfahren, wie beispielsweise das österreichische „*Sigmund-Horizontal-Isolierverfahren*“, dessen Seilsäge bei allen Wandstärken und -materialien nicht mehr mit Wasser gekühlt zu werden braucht, sondern Druckluft zur Kühlung einsetzt (Arendt und Seele 1999).

Alle Sägevorgänge benötigen außerdem einen großen Arbeitsraum neben dem zu sanierenden Mauerwerk. Er beträgt bei der Mauersäge im günstigsten Fall we-

nigstens 1,50 m und kann beim Seilsägeverfahren bis zu 5,00 m anwachsen. In engen Altstadtquartieren wird es daher sehr häufig zu Platzproblemen kommen.

Gefahr von Verletzungen Die Gefahr von Verletzungen besteht bei Einsatz von Diamantseilsägen durch gerad- oder drehbewegte Maschinenteile, durch reißende Sägeseile sowie herumfliegende Splitter, was insbesondere bei der Trennung von Mischmauerwerk relativ häufig vorkommt. Gefahrbringend sind außerdem nicht abgeböschte bzw unverbaute Gräben. Deshalb sollte die Bedienung der Diamantseilsägemaschine mit Hilfe einer Fernbedienung außerhalb des Gefahrenbereiches erfolgen. Die Seilführung im Gebäudeinneren muss durch eine feste Absperrung die Gefährdung unbeteilter Personen verhindern. Beim Einsatz von Mauerschwert-sägemaschinen sind ähnliche Gefahren zu erwarten.

An schwer zugänglichen Gebäudeteilen wird die Handsägemaschine zur Mauerwerkstrennung verwendet. Das diese Sägemaschinen bedienende Personal ist durch herabfallende Mauerbrocken gefährdet. Im Extremfall ist der Einsturz von Bauwerksteilen durch zu schwache oder falsch angebrachte Abstützungen möglich.

Rammverfahren Bei Mauerwerk mit horizontal durchgehenden Lagerfugen lassen sich Riffelbleche aus Edelstahl-Wellplatten aus ferritischem Chromstahl mit Hilfe einer pneumatischen Ramme in die Fuge schlagen, wobei sich die Bleche gegenseitig wenigstens mit einer Welle überlappen müssen. Das Mauerwerk muss jedoch zuvor untersucht werden, ob es für das Einschlage- oder Rammverfahren geeignet ist. Ist nämlich der Mauerwerksverbund nicht mehr kraftschlüssig und von Hohlräumen durchsetzt, besteht durch die Wucht des Einschlagens Gefahr für das gesamte aufgehende Mauerwerk, d. h. seine einzelnen Steine können sich lösen und herausfallen. In diesem Falle muss eine Verfestigung des Mauerwerks vorausgehen. Des weiteren muss das Mauerwerk auf seinen Chloridgehalt hin untersucht werden, um das Risiko des Lochfraßes in den Chromstahlblechen auszuschließen oder zumindest kalkulierbar zu machen. Bei einem hohen Chloridgehalt, der sich in sehr vielen historischen Mauern findet, muss deshalb zu Molybdänstahlblechen übergegangen werden.

Das Rammverfahren eignet sich allerdings nur für Mauerwerk bis zu einer Dicke von 0,80 bis 1,00 m, benötigt aber einen unverhältnismäßig großen Arbeitsraum. Deshalb ist es besonders für Maßnahmen oberhalb des natürlichen Geländes zu empfehlen. Für das Rammverfahren sind keine größeren Abstützungsmaßnahmen erforderlich, da die Lastübertragung im Mauerwerk selbst nicht unterbrochen wird. Es handelt sich also um eine recht preiswerte und daher wirtschaftlich sinnvolle Technik insbesondere bei Backsteinmauerwerk, vor allem, wenn sie im Sockelbereich über dem Gelände und unterhalb des Erdgeschosses ausgeführt werden kann. Ansonsten ist ein Arbeitsraum von mind. 2,00 m Breite neben dem zu sanierenden Mauerwerk sicher zu stellen.

Ein weiteres Problem kann die Lärmentwicklung beim Rammverfahren darstellen. Die Schläge der Ramme sind weithin zu hören und wirken auf die Umwelt sehr störend. Deshalb empfiehlt sich gerade in solchen Bereichen, wo es auf den Lärmschutz ankommt, eine Kombination aus Ramm- und Mauersägeverfahren. Das

Mauerwerk wird dabei zunächst aufgetrennt und dann wird das Stahlblech in die Trennfuge eingerammt. Jetzt ist die Einschlagwucht sehr gemindert; beide, Umwelt und Mauerwerk, bleiben weitgehend geschont.

Bohrkernsperrre, Kernbohrverfahren („Isobohrverfahren“) Bei besonders dickem Mauerwerk empfiehlt sich das als „Isobohrverfahren“ patentierte Kernbohrverfahren. Es beruht auf dem Wirkprinzip der Mauertrennung: viele waagerecht dicht nebeneinander gesetzte Bohrlöcher trennen das Mauerwerk horizontal auf. Die Bohrreihen werden abschnittsweise und am Ende einander jeweils überlappend durchgeführt. Unmittelbar nach Fertigstellung eines Bohrreihenabschnitts werden die Löcher mit wassersperrendem Material, z. B. vergütetem Beton, verpresst. Beim „Isobohrverfahren“ betragen die Bohrlochdurchmesser 112 mm. Ein Mehrspindelbohrwerk erzeugt in einem schleifenden, also nicht schlagenden Arbeitsvorgang jeweils vier Löcher. Es handelt sich um ein sehr aufwendiges Verfahren, bei dem die Härte des Steins keine Rolle spielt. Setzungsschäden sind bei fachgerechter Ausführung nicht zu erwarten. Deshalb ist das Isobohr-Verfahren besonders für zweischaliges Mauerwerk mit einer desolaten Innenfüllung geeignet. Zugleich kann ohne besonderen Aufwand eine Vernadelung vorgenommen werden (Venzmer 2001).

7.1.1.2 Injektionen

Bei den gemeinhin Trockenlegungsverfahren genannten Technologien zur Absenkung der kapillar verursachten Mauerwerksdurchfeuchtung nehmen die Injektionsverfahren, früher auch „Bohrlochsperrre“ genannt, einen festen, freilich nicht ganz umstrittenen Platz ein (Hettmann 1993). Sie werden seit etwa 50 Jahren in der Baupraxis erfolgreich eingesetzt (Weber 1997). Dabei handelt es sich um solche, bei denen Wirkstoffe in Form von Lösungen, Emulsionen, Suspensionen oder Schmelzen in das Mauerwerk injiziert werden. Sie wirken dort in dreifach verschiedener Weise:

- kapillarabdichtend, indem sie die Poren verstopfen, der Wassertransport wird unterbunden;
- Kapillaren verengend, die Sauggeschwindigkeit wird durch Verkleinern des Porenradius reduziert,
- hydrophobierend, der kapillare Benetzungswinkel wird negativ verändert, die Steighöhe wird dadurch depressiv.

Selbstverständlich können die drei aufgezählten Wirkprinzipien auch miteinander kombiniert werden. Außerdem dürfen die Injektionsstoffe über einen längeren Zeitraum hinweg in ihrer Wirksamkeit nicht nachlassen. Leider wird oft die Zusammensetzung des Injektionsmittels nicht genau gekennzeichnet, so dass eine Untersuchung der Zusammensetzung oder ein detailliertes Hinterfragen erforderlich ist, um die generelle Wirksamkeit beurteilen zu können.

Vor Beginn einer Injektionsmaßnahme muss das Mauerwerk auf jeden Fall daraufhin untersucht werden, ob es sich überhaupt für Injektionsverfahren eignet. Besitzt beispielsweise ein zweischaliges Natursteinmauerwerk ein lockeres Füllungsgefüge, werden die großen Hohlräume die wäßrigen Injektionsmittel gleich-

Abb. 7.12 Bohrlochsperre. Die Löcher wurden in zwei Reihen übereinander versetzt gebohrt



sam versickern lassen oder sie werden an einer Fehlstelle der äußeren Schalen unvermittelt austreten. In solch einem Fall werden unbewusst bei weitem zu viele Liter an Chemikalien in das Mauerwerk und von da aus in das anstehende Erdreich eingebracht, die Maßnahme wird zugleich wirkungslos verpuffen, sie ist dabei umweltschädigend und unwirtschaftlich. Bei lockerem Mauerwerksgefüge muss unbedingt eine Füllung der Hohlräume mit geeignetem Verpressmörtel der Injektion vorausgehen. In den meisten Fällen werden 10–15 kg Bohrlochflüssigkeit pro m² Mauerquerschnitt ausreichen. Erhöhter Verbrauch ist ebenfalls ein deutliches Indiz für das wahrscheinliche Misslingen einer Injektion (Abb. 7.12).

Aber auch die Oberfläche des Injektionsbereiches kann vor Beginn der Arbeiten nicht ohne eine Abdichtung bestehen. Zunächst werden die Fugen ca. 2 bis 5 cm tief sauber ausgekratzt und gegebenenfalls neu verfugt. Dann sollte die Mauerwerksoberfläche in diesem Bereich mit einem Verdichtungsmittel imprägniert werden. Schließlich wird ein Zementspritzwurf und ein Zementmörtel MG III im Bereich der Bohrlöcher auf die Wandfläche aufgebracht. Ist Wasser in flüssiger Form vorhanden oder steht solches zu erwarten, sollte eine Flächenabdichtung mit zementgebundenen Sperrputz auf die Mauerwerksoberfläche aufgebracht und glatt verstrichen werden. Auf dieser geglätteten Fläche lassen sich nun die Packer der Füllschläuche sauber anbringen und die Injektionsmittel laufen tatsächlich in die Bohrlöcher anstatt daneben, andererseits kann die Injektionsflüssigkeit nicht durch feine Risse und Löcher an der Oberfläche unkontrolliert aus dem Mauerwerk austreten. Bei schützenswerten Oberflächen müssen die vorhandenen Risse und Löcher einzeln sorgfältig verschlossen werden, die Wandoberfläche muss außerdem während der Instandsetzungsmaßnahme ständig kontrolliert werden. Dringt Injektionsgut an einer Stelle aus, muss der Vorgang sofort abgebrochen werden und kann erst wieder aufgenommen werden, wenn auch diese Stelle abgedichtet worden ist.

Bei gering saugenden Mauerwerk aus sehr feinporigem Steinmaterial wird der Kapillartransport des Wassers hauptsächlich über den Fugenmörtel erfolgen. In solchen Fällen müssen sich die Injektionsbohrungen auf das allein Wasser saugende Fugenmaterial konzentrieren, damit die Injektionsflüssigkeit das vorhandene Fugennetz möglichst ganz erfasst (Arendt und Seele 1999). Ein Trockenlegungsverfahren mit Injektionen kann also selbst bei sehr harten Mauersteinen sinnvoll sein.

Dabei kann allerdings schon das bloße Bohren mit einer hier unbedingt erforderlichen Schlagbohrmaschine schädlich auf das Mauerwerk wirken und die gesamte Maßnahme wegen des hohen Bohraufwandes letztlich unwirtschaftlich machen. Aber auch bei weichen Steinen z. B. in einem Backsteinmauerwerk sollte das Injektionsgut in eine durchgehende Fuge z. B. in die Lagerfuge eingebracht werden. Injektionsmittel verteilen sich in den kapillaraktiveren, also saugfähigeren Mörtelfugen wesentlich besser als im Steinmaterial (Weber 1997).

Die Injektionsstoffe dürfen auf keinen Fall negative Auswirkungen auf das Mauerwerk ausüben. Wenn es sich bei den Injektionsflüssigkeiten entweder um zementgebundene, wäßrige Suspensionen oder um kunstharzgebundene mineralische Mörtel handelt, muss das Mauerwerk auf jeden Fall zuvor dahingehend untersucht werden, ob es gipshaltig ist. Wenn Gips nachgewiesen wird, können nur gipsresistente Injektionsmittel zum Einsatz gelangen, um gefährliches Gipstreiben auszuschließen. Außerdem darf das Injektionsgut keinesfalls die hygrokopische Gleichgewichtsfeuchte erhöhen, indem es zusätzliche, bauschädliche Salze im Mauerwerk bildet, wie es z. B. bei Alkalisilikaten und Alkalimethylsiliconaten der Fall sein kann. Sind Polyuretane und Paraffine Bestandteile des Injektionsmittels, so besteht die Gefahr, dass sie Bakterien als Nahrungsmittel dienen und daher ihre kapillarbrechende Wirkung schon bald einbüßen.

Bei den Injektionsflüssigkeiten kommt es vor allem auf ihre Viskosität an, um eine möglichst große Eindringtiefe und Verteilung im Mauerwerk herzustellen. Außerdem muss ihre Oberflächenspannung möglichst klein und ihre Beständigkeit möglichst groß sein. Sie dürfen ihre Eigenschaften weder durch substrateigene noch durch substratfremde Bestandteile während der Injektion über den gesamten Applikationszeitraum hin verändern. Der Härtungsverlauf der eingebrachten Injektionsflüssigkeit muss langsam ausgeglichen und dabei wasserbindend bzw. – verdrängend wirken. Natürlich sollte man nicht vergessen, auf die Baustellentauglichkeit, also auf den Einsatz möglichst weniger Mischungskomponenten, zu achten.

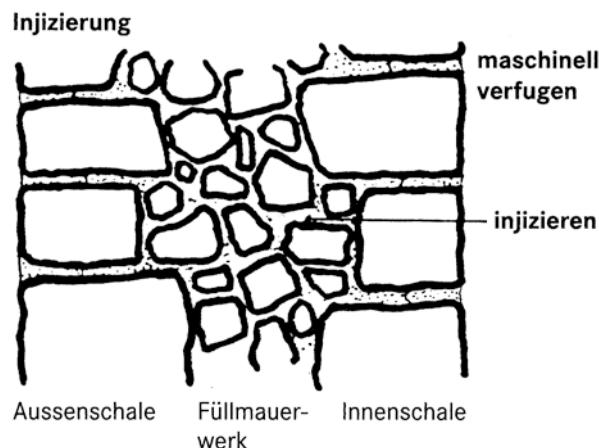
Die Technik des Einbringens muss die Verteilung des Injektionsmittels über den gesamten Mauerwerksquerschnitt sicherstellen. In der Praxis haben sich die drucklosen, allein durch Aufsaugen wirksamen Verfahrensvarianten allerdings nur an gut saugendem, nicht allzu nassem, historischem Mauerwerk bewährt. Gleichwohl wird den Verfahren, die mit Druck arbeiten, immer öfter der Vorzug gegeben, denn eine kapillare Durchtränkung sowohl von feinkapillaren Systemen wie Kalksandsteinen wie auch grobporigen wie Porenbeton ist ohne Druck nur begrenzt möglich. Dies gilt sowohl für die trockenen als auch für die kapillar durchfeuchteten Baustoffe. Der kapillare Durchfeuchtungsgrad spielt also bei der Wahl des Injektionsverfahrens eine wesentliche Rolle und stellt einen nicht zu unterschätzenden Risikofaktor für den Erfolg der Maßnahme dar (WTA-MERKBLATT 4-4-96). Verfahren mit Druckanwendung sind bei einem geringen Durchfeuchtungsgrad und gut saugfähigem (Tab. 7.2) Mauerwerk zumeist nicht erfolgreicher als solche ohne Druck (Hettmann 1993). Weil die Injektion jedoch zumeist an einem kapillar stark durchfeuchtetem Mauerwerk stattfindet, ist es überhaupt fraglich, ob es drucklos möglich ist, den bereits mit Wasser belegten Kapillarraum sowie den Luftporenraum mit dem Injektionsmittel zu füllen. Erst die Einwirkung einer Druckinjektion

Tab. 7.2 Einteilung und Beurteilung von Injektionsmitteln

Art des Injektionsmittels	Wirkungsweise
Wässrige Suspensionen	Zementsuspensionen Mikrozementsuspensionen Feinstoffsuspensionen (Werden heute zur Hohlräumverfüllung eingesetzt.)
Wässrige Lösungen (Kolloiddisperse Systeme)	Alkalisilikate = Wasserglaslösungen, Nachteil: es wird Alkalikarbonat gebildet, ein zusätzliches bauschädliches Salz Alkalimethylsiliconate Nachteil: es wird Alkalikarbonat gebildet, ein zusätzliches bauschädliches Salz
	Kombinationsprodukte aus Alkalisilikaten und Methylsiliconaten Nachteil: es bilden sich bauschädliche Salze
	Höheralkylierte Siliconate
Wässrige Emulsionen	Silicon-Mikroemulsionen Silicon-Mikroemulsionskonzentrate (SMK-Technologie)
Lösungen in organischen Lösungsmitteln	Bitumenemulsionen Siloxanlösungen und Silane (Hydrophobierungsmittel)
	Silikonharzlösungen Kieseläureethylester mit hydrophobierten Zusätzen, Kunstarzlösungen (überwiegend Polyurethane und Acrylate), Bitumenlösungen
Schmelzen	Paraffine Bitumina

schafft eine schnelle Verteilung des Injektionsguts auch im extrem durchfeuchteten Baustoff. Der Druck muss sich selbstverständlich an der Festigkeit des Baustoffes orientieren. Druckinjektionen sind besonders bei grobporigen Baustoffen einzusetzen, deren Poren durch kapillare Wirkungsmechanismen meist nicht zugänglich sind. Druckinjektion zwischen 5 und max. 20 bar haben sich durchaus bewährt und verstärken die Grobverteilung des Injektionsgutes sinnvoll. Außerdem bemerkt

Abb. 7.13 Injizierung von zweischaligem Mauerwerk



man am plötzlich auftretenden Druckabfall, dass das Injektionsgut in unbekannt gebliebene Hohlräume versickert. Drücke bis zu 100 bar sind bei der Mauerwerks-trockenlegung jedoch blanker Unsinn (Abb. 7.13).

Die Hohlräumigkeit historischer Mauern stellt – wie bereits ausgeführt – einen häufig zu gering beachteten Risikofaktor dar. Bei zerklüfteten, zweischaligem Mauerwerk muss prinzipiell davon ausgegangen werden, dass weder vollfugige noch durchgängige Vermauerung vorliegt, sondern dass vielmehr in allen Zonen der gemauerten Wand Hohlräume zu erwarten sind (s. Abb. 6.14). Hohlräume müssen entweder vor der Injektion verfüllt oder verpresst werden oder bei der Anwendung spezieller Verfahrenstechniken mit Hilfe von besonderen Injektionsvorrichtungen überbrückt werden. Gerade deshalb haben sogenannte „*Impuls-Sprühverfahren*“, eine nicht geringe Bedeutung erlangt, bei denen Bohrlochwandungen über einen längeren Zeitraum hinweg unter Druck benetzt werden, ohne dass eine Flüssigkeitsansammlung im Bohrloch entsteht. Vor Ort werden bei diesen Verfahren stets eine Vielzahl von Bohrlöchern nebeneinander zugleich durch Packer versorgt. Zur Füllung der Hohlräume finden Mikrozementsuspensionen Verwendung, wobei bereits 30 bis 60 min nach dem ersten Arbeitsgang der kapillarbrechende Wirkstoff über das installierte Packersystem wieder weiter injiziert werden kann. Beispielsweise das „*StoMurisol*“-Impulssystem der Fa. Stotmeister injiziert Silicon-Microemulsionen selbstständig über eine elektronische Steuerung in das Mauerwerk und sorgt so für eine gleichmäßig Verteilung über den gesamten Mauerwerksquerschnitt. Der Verbrauch beträgt 20–30 ltr/m².

Die „*Mehrstufeninjektion*“ hat sich bei hohlräumigem, stark durchfeuchtetem Mauerwerk bedingt bewährt. Mit diesem Verfahren soll eine bessere Verteilung des Injektionsmittels im Mauerwerk über Fehlstellen hinweg und die Entfaltung der hydrophoben Wirkung erreicht werden (Hettmann 1993).

Bei der Feinverteilung des Injektionsgutes, die zumeist durch die kapillare Strömung erfolgt, ist außerdem immer der Faktor Zeit entscheidend: es muss also mehrere Tage, manchmal bis zu 40 Tage lang, Injektionsflüssigkeit in die Bohrlöcher

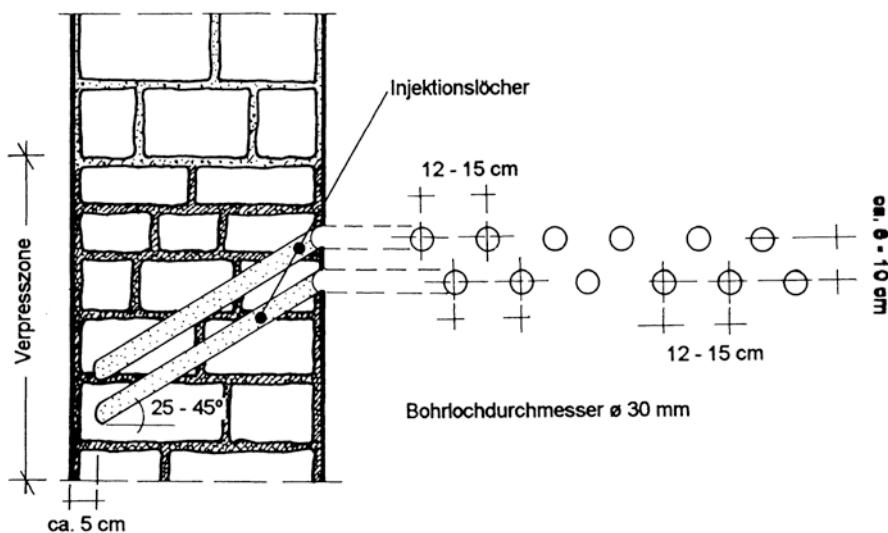


Abb. 7.14 Bohrlochabstände nach (Nadoushani 1992)

eingefüllt werden. Einen nicht zu unterschätzenden Mechanismus der Injektionsgutverteilung stellt die Diffusion dar, weil es sich zumeist um flüssige Chemikalien handelt. Wassermischbare, „ionogene“ Injektionsmittel kolloiddisperser Systeme können sich im Zuge des Konzentrationsausgleichs auch in einem stark durchfeuchteten Mauerwerk ausbreiten. Wiederum ist Voraussetzung eine ausreichend lange Injektionsdauer; das Injektionsmittelangebot muss über einen langen Zeitraum dauernd aufrechterhalten werden. Dazu werden am Bohrloch Behälter oder Trichter mit oder ohne Bohrlochlanze angesetzt, die ständig, auch nachts mit Injektionsflüssigkeit gefüllt sein müssen.

Injektionen werden entweder in einer Reihe von relativ eng nebeneinander liegenden Bohrlöchern oder besser in zwei Reihen von übereinander versetzten Bohrlöchern eingebracht. Der Bohrlochabstand sollte bei beiden Varianten möglichst dem zu erwartenden Saugverhalten der Steine im Mauerwerk entsprechen: Backsteine, weiche Sandsteine oder Kalkmörtelfugen saugen im trockenen Zustand etwa bis zu einem Saugabstand von 6 bis 7 cm, was einen Bohrlochabstand von etwa 12 cm, bei härteren Steinen besser 10 cm, erfordert, um mit hoher Wahrscheinlichkeit eine fehlerlose Überdeckung zu erreichen. Bei entsprechender Stärke des Mauerwerks müssen Bohrlöcher von außen und von innen schräg nach unten gebohrt werden. Der Bohrwinkel hängt vom Mauermaterial ab: Backsteinmauerwerk verträgt einen sehr viel flacheren Bohrwinkel als hartes Natursteinmauerwerk. Die Tiefe der Bohrlöcher ist ebenfalls eine Funktion des Mauermaterials: einerseits soll der gesamte Mauerwerksquerschnitt zuverlässig abgedichtet werden, andererseits das teuere Injektionsgut nicht auf der anderen Seite der Mauer auslaufen. Als Faustregel gilt: vom Wandquerschnitt sollen wenigstens die letzten 5 cm stehen bleiben (Abb. 7.14).

Grundsätzlich muss bemerkt werden, dass trotz einer funktionstüchtigen Injektion manchmal erst nach vielen Monaten die Feuchtigkeit im Mauerwerk oberhalb der kapillarbrecenden Schicht abnimmt. Nach wenigen Monaten sollte sich allerdings bereits ein gewisser Trend hin zu mehr Trockenheit bemerkbar machen. Ausgeprägte Trockenheit kann auch schon nach einem Jahr eintreten, wird aber gewöhnlich erst in ca. zwei bis drei Jahren erreicht (Weber 1997). Das oberflächige Verdunsten der Restfeuchte transportiert außerdem die noch vorhandenen, bereits im Mauerwerk gelösten Salze an die Oberfläche. Auch dieser Salztransport hört erst nach mehreren Jahren auf. Deshalb sind zur Nutzbarmachung des Mauerwerks unbedingt flankierende Maßnahmen erforderlich (s. Kap. 10).

Über die Wirkungsdauer von Injektionsmaßnahmen liegen indessen bereits Erfahrungen vor, die von einer wirksamen Abdichtung über 30 Jahre und mehr hinweg berichten. Allerdings sind Injektionen bei stark salzhaltigem Mauerwerk mit einem Durchfeuchtungsgrad $\geq 50\%$ sehr problematisch und nur sehr wenige Injektionsstoffe sind dann noch erfolgreich einzusetzen. Die Wirksamkeit eines Injektionsverfahrens sollte deshalb mindestens nach zwei Jahren überprüft werden. Grundsätzlich sind qualitätssichernde Maßnahmen unerlässlich.

Zusammenfassend lässt sich feststellen:

- Je höher der kapillare Durchfeuchtungsgrad ist, desto wichtiger ist es, das Injektionsmittel unter Druck im Mauerwerk zu verteilen.
- Großporige Baustoffe verlangen ebenfalls eine Injektionsmitteleintragung unter Druck, denn große Porenräume werden auf kapillarem Wege nur unzureichend oder gar nicht gefüllt.
- Hohlräume im Mauerwerk müssen vor jeder Trockenlegungsmaßnahme erfasst und z. B. durch eine vorgeschaltete Zementinjektion verfüllt werden. Es kann aber auch mit hohlraumüberbrückender Technik, z. B. dem Impulsverfahren, gearbeitet werden.
- Bei Anwendung einer Mehrstufeninjektion zur Trockenlegung kann deren Wirkstoff, z. B. eine Siliconmikroemulsion, binnen einer Stunde nachinjiziert werden. Besonders schwierige Mauerwerke mit hoher Inhomogenität, Hohlräumigkeit und Durchfeuchtungsgrad können mit ihrer Hilfe trockengelegt werden.
- Der anzuwendende Druck muss sich immer an der Festigkeit des Mauerwerks orientieren. Er kann zwischen 3 und 20 bar betragen. Der Druck muss in jedem Fall wenigstens 5 bis 10 min aufrecht erhalten werden, um die geforderte durchgängige Verteilung sicher zu stellen.

7.1.1.3 Elektrophysikalische Verfahren (Elektroosmose)

Es handelt sich hierbei um Technologien zur Trockenlegung von Mauerwerk, die aktiv oder passiv, d. h. mit oder ohne Fremdstrom, die elektrophysikalischen Verhältnisse einer feuchten Wand verändern. Das Grundprinzip ist bei allen auf dem Markt angebotenen Verfahren gleich: An oder auch in das Mauerwerk werden Elektroden gelegt, zwischen denen sich ein elektrisches Feld aufbaut, das den kapillaren Wassertransport beeinflussen soll. Diese Elektroden bestehen zumeist entweder aus flexiblen Bändern oder Kabeln oder aus starren Metallstäben, die leitend miteinander verbunden werden. Diese Elektroden waren zunächst die Hauptschwachstelle

solcher Systeme. Deshalb entwickelte man flächige Elektroden, leitende Matten oder Gitter, die einen günstigeren Aufbau des elektrischen Feldes bewirken sollten. Einige Anbieter schreiben zur besseren leitenden Verbindung Mörtelzusätze oder Anstriche vor. Die erfolgreichsten der heute am Markt befindlichen Verfahren arbeiten mit Platin-Titan-Elektroden, die Salzen ausreichend lange zu widerstehen vermögen. Bei dickeren Mauern werden außerdem Elektroden ins Mauerinnere verlängert. Die Anbringung der Elektroden kann problemlos Hindernisse und Öffnungen umfahren sowie auf besondere Bedingungen des Mauerwerks eingehen; sie wären deswegen gerade für historisch wertvolles Mauerwerk mit künstlerisch gestalteten Putz- und Stuckapplikationen oder Wandmalereien besonders geeignet.

Die Eingriffe in das originale Mauerwerk sind bei der elektrophysikalischen Trockenlegungstechnik am geringsten. Es wird lediglich ein kleiner Wandschlitz für die Elektroden benötigt, der anschließend wieder verputzt wird. Deshalb werden solche Verfahren immer wieder gerne angewendet. Besonders in der Denkmalpflege, wo es hauptsächlich auf den Erhalt originaler Bausubstanz ankommt, wird häufig mit elektrophysikalischen Abdichtungsverfahren experimentiert.

Der elektrische Feldaufbau, der schließlich die Trockenlegung bewirken soll, entsteht in der Theorie auch passiv. Bei den Verfahren, die sich auf einen passiven Feldaufbau verlassen, sollen die aus unterschiedlichen Metallen bestehenden Elektroden ein galvanisches Element analog zur elektrochemischen Spannungsreihe der Metalle erzeugen. Auch der Unterschied des pH-Wertes der beiden Elektrodenmilieus soll zum Feldaufbau beitragen. Aber all diese theoretischen Überlegungen haben sich bislang in der Praxis nur bedingt verifizieren lassen. Das Ergebnis war häufig enttäuschend. Passive Verfahren können zur Trockenlegung überhaupt nicht angewendet werden, denn jedes galvanische Element muss sich zwangsläufig selbst durch Abbau zerstören (gleiche Wirkungsweise wie z. B. die Batterie im Auto). Werden sie als wirksam dargestellt, entsprechen sie eher einem Wunschbild ihrer Anbieter als der elektrophysikalischen Wirklichkeit (Venzmer 2001).

Aktive Verfahren dagegen misstrauen der Wirkung schwacher elektrischer Felder und führen den Elektroden deshalb ständig Gleichstrom zu. Sie arbeiten mit Spannungen zwischen unter 2 V und bis zu 24 V, außerhalb Deutschlands auch mit deutlich höhere Voltzahlen, um das gewünschte Feld aufzubauen. Diese Gruppe von elektrophysikalischen Trockenlegungsmaßnahmen hat sich in der Praxis ebenfalls nicht unbedingt bewährt, da die aktive elektrophysikalische Anlage zumindest ab einem bestimmten Versalzungsgrad nicht mehr funktioniert (Arendt und Seele 1999). Insbesondere die Elektroden, selbst diejenigen, die als völlig korrosionsfest bezeichnet werden, bauen sich, wenn auch unterschiedlich rasch, zwingend durch Korrosion ab. Man setzte deshalb sog. „*Opferelektroden*“ ein oder griff zu Platin-Titan-Elektroden, die wesentlich geringere Korrosionsneigung zeigen. Die Korrosionsprodukte jedoch sind nicht ungefährlich, Teile davon können zur irreversiblen Verseuchung des Mauerwerks beitragen.

Zwar scheinen Verfahren, wie etwa das AET-Verfahren (Aktive Entsalzung und Trocknung),- es wurde vom Zentralinstitut für physikalische Chemie an der Akademie der Wissenschaften der DDR zusammen mit dem Institut für Wohnungs- und Gesellschaftsbau der Bauakademie der DDR entwickelt – sich als durchaus wir-

kungsvoll zu erweisen, freilich bleibt auch hier die Schwachstelle aller elektrischen Verfahren, nämlich die Lebensdauer des Elektrodenmaterials (Opferelektrode), bisher u. E. noch immer nicht endgültig gelöst. Außerdem geht dem Denkmalpfleger der beim AET-Verfahren erforderliche Eingriff in die Originalsubstanz meistens zu weit (Venzmer 2001).

Die Verfahren, die mit Metallgittern oder Gittern aus leitfähigem Kunststoff arbeiten, sind ebenfalls als problematisch einzustufen. Jede derartige Anlage benötigt zum Funktionieren ausgerechnet das Wasser, das sie entfernen soll. Daher gibt es ab einem gewissen Trockenheitsgrad eine Funktionsgrenze für alle diese Systeme, wobei insbesondere derjenige Grad an Durchfeuchtung, bei dem das System gerade noch funktioniert, bis heute nicht erforscht ist (Hettmann 1993).

Das österreichische System mit der patentierten „Kerasan“-Elektrode hat sich nach Auskunft des Herstellers bis heute auf dem Markt bewährt: Dabei werden mit Kunststoff ummantelte Titandrähte als Elektroden in das Mauerwerk eingebracht. Die positive Elektrode wird über Niveau, die negative Elektrode im Fundamentbereich verlegt. Über ein Steuergerät werden die Elektroden mit Gleichstrom versorgt. Der Gleichstrom fließt von der positiven Elektrode über das Mauerwerk zur negativen Elektrode. Das Wasser in den Kapillaren wird in Richtung negativer Elektrode bewegt. Da das Kapillarwasser nicht gegen die Stromrichtung hochsteigen kann, bildet die negative Elektrode die Sperre gegen kapillar aufsteigende Feuchtigkeit (www.kerasan.at).

7.1.2 Nachträgliche Vertikalabdichtung

Die nachträgliche vertikale Abdichtung gegen andringendes Wasser gehört in der Tat zu den bei Mauerwerk unterhalb der Geländeoberfläche am häufigsten durchgeführten Instandsetzungsmaßnahmen, obwohl es sich dabei in der Regel um sehr kostspielige bauliche Veränderungen und um keine Trockenlegungsmaßnahmen im eigentlichen Sinne handelt. Der seitliche Andrang von Wasser wird zwar abgewehrt, aber die Aufstandsfläche des Mauerwerks auf dem Baugrund wird weitersaugen. Das Saugverhalten einer relativ geringen Aufstandsfläche wird man vielleicht vernachlässigen können, bei dicken Mauern aber wird vertikales Abdichten nur im Verein mit horizontalen Maßnahmen erfolgreich sein können. Wahrscheinlich greifen die professionellen „Bausanierer“ deswegen so gerne zur vertikalen Abdichtungsmöglichkeit, weil sie ihnen vom Neubau her bereits gut vertraut ist. Aber bei historischem Mauerwerk lassen sich die Neubaunormen als allgemein anerkannte Regeln der Bautechnik kaum anwenden, denn bereits das Mauerwerk selbst erfüllt eine wesentliche Forderung der DIN 1053 nicht, es ist nämlich nicht homogen.

Will man Mauerwerk nachträglich vertikal abdichten, muss zunächst geprüft werden, durch welche Art von Wasser oder Feuchte es bedroht wird: Ob es sich um normale Erdfeuchte, d. i. die grundsätzlich vorhandene Bodenfeuchtigkeit gemäß DIN 4095 und DIN 18 195 Teil 4, oder um frei ablaufendes, nichtdrückendes Wasser, welches keinen hydrostatischen Druck aufbaut z. B. frei ablaufende Arten von Oberflächenwasser, Sickerwasser, Schichtenwasser gemäß DIN 18 195 Teil 5 oder

gar um drückendes Wasser, z. B. aufstauendes Oberflächen- oder Schichtenwasser bzw. Grundwasser handelt (WTA – MERKBLATT 4–6-98/D). Dies lässt sich durch Anlegen von Sondagen (s. Abb. 5.2) sowohl auf der Außenseite der Mauer als auch von solchen etwa in einem Keller klären. Sammelt sich rasch Wasser in den Sondagegruben, muss der Lastfall „*Von außen drückendes Wasser*“ nach DIN 18 195–Bauwerksabdichtungen – Teil 6 angenommen werden. Bleiben die Sondagen weitgehend trocken, so haben wir es mit nichtdrückendem Wasser oder gar nur mit normaler Erdfeuchte zu tun. Besteht das anstehende Erdreich aber aus einem bindigen Boden muss immer mit drückendem Wasser gerechnet werden, auch wenn die Sondagen über längere Zeit trocken geblieben sind.

Zugleich damit legt man die neue Nutzung des Bauwerks fest. Danach kann eine sorgfältige Abdichtungsplanung erstellt werden, die auch mögliche anstoßende Zwischenmauern oder die Lage von Klärgruben im Baugrund dicht am zu behandelnden Mauerwerk kennt und berücksichtigt. Wegen der jeweils recht hohen Kosten solcher Maßnahmen sollte von Anfang an der Bauherr bei der Abdichtungsplanung mitwirken. Hat der Architekt alles erforderliche geklärt, muss er eine sehr sorgfältige Ausschreibung definieren, die dem ausführenden Betrieb eine verlässliche Kalkulationsgrundlage bietet. Während der Ausführung muss er alle Arbeitsgänge streng kontrollieren, denn es dürfen weder Fehlstellen noch durch unerwartete Situationen überflüssige Verzögerungen im Bauablauf entstehen. Die Arbeiten müssen in jedem Falle nach den anerkannten Regeln der Technik ausgeführt werden, was aber, wie bereits gesagt, nicht nur die Ausführung nach DIN sondern auch die nach bewährten Richtlinien und Merkblättern erfüllt (Weber 2000).

Vertikale Abdichtungstechniken bei drückendem Wasser Ist der gravierendste Abdichtungsfall nach DIN 18 195 Teil 6 gegeben und es steht drückendes Schichtenwasser am Mauerwerk an, kann zum einen mit sehr hohem Aufwand durch Errichten einer inneren Wanne, zum anderen mit den von der DIN 18 195 empfohlenen äußeren Abdichtungsmaßnahmen abgeholfen werden. Solche Maßnahmen verursachen freilich immer sehr hohe Kosten und sind selbst dann nur selten zu empfehlen, wenn die vorgesehene hochwertige Nutzung nirgendwo anders in – oder außerhalb des Hauses untergebracht werden kann.

Wenn der Keller wie in Altstadtkernen häufig allseits unzugänglich ist, kommt möglicherweise nur die innere wasserdichte Wanne in Frage. Sie lässt das Kellermauerwerk in der Nässe stehen und muss deshalb meist mit einer Horizontalabdichtung oberhalb der Geländeoberkante verbunden werden. Auf die feuchte Kellerwand wird eine zweite Wand aus wasserdichten Folien und einer zweiten inneren stabilen Schicht als Putzträger aufgelegt. Andererseits kann man auch durch wasserdichte Sperrputze und flexible Dichtungsschlämme eine innere vertikale Abdichtung erreichen. Über einer Flächendränage, die am besten an einen Pumpensumpf mit einer Schwimmerpumpe angeschlossen wird, wird ein neuer Fußboden aufgebaut. Solche Anlagen führen allerdings nicht zu umfassender Trockenheit, eine gewisse Restfeuchte muss hingenommen werden. Außerdem sind solche Anlagen sehr teuer und sollten nur in Ausnahmefällen erwogen werden, zumal sie auf die Umgebung des Gebäudes schädlich wirken, wenn sie den Grundwasserpegel senken.

Abb. 7.15 Keller in unsaniertem Zustand



Abb. 7.16 Auf verschweißten Bitumenbahnen wurde die Bewehrung für einen Betonfußboden ausgelegt. Die Wände wurden mit einer dichten Betonvorsatzschale ausgestattet



Dies soll ein praktisches Beispiel einer innenliegenden Wanne verdeutlichen (Abb. 7.15):

Der Verfasser hat 1996 eine solche Wanne in einem Mehrfamilienwohn- und Geschäftshaus in Leipzig aus dem Jahre 1880 eingebaut, weil mit einem Anstieg des Grundwassers bis 50 cm über Kellerfußboden gerechnet werden musste. Um zu verhindern, dass der Wasserdruk die Wanne aufschwimmen lässt, hat er zusammen mit dem Tragwerksplaner zu allererst die sehr dicken Backsteinwände des Kellers bis einen Meter über den höchsten, bekanntgewordenen Grundwasserpegel hinauf, insgesamt 1,50 m über Kellerboden, einen Stein tief ausstemmen lassen, um die Wände der Wanne in das vorhandene Mauerwerk einbinden zu können. Die abgestemmte Fläche wurde mit Zementmörtel MG III geglättet. Auf ihr wurden Bitumenpappen und Folien an der aufgehenden Wand angeklebt bzw. mit Dübeln wassererdicht verankert. Am Boden wurden die Abdichtbahnen auf einer Sand-Kies-Packung ausgelegt. Auf eine Flächendränage wurde verzichtet. Dann wurden Boden und Wände der Wanne mit Beton B 25 in einer Stärke von 15 cm hergestellt. Die Außenwände oberhalb der Wannenwände wurden mit einem Sperrputz auf Zementbasis abgedichtet und schließlich mit einem Sanierputz/WTA verputzt (Abb. 7.16).

Abb. 7.17 Der Keller nach der Instandsetzung



Als problematisch haben sich allerdings die Zwischenwände erwiesen: Dort wo diese an die Außenwand anstoßen, musste die Wanne zwangsläufig unterbrochen werden. Die Standsicherheit der Zwischenwände wäre durch Aufschneiden und Einlegen einer Dichtungsbahn derart beeinträchtigt worden, dass auf solche Abdichtungsmaßnahmen verzichtet und die relativ kleine Saugfläche des Zwischenwandquerschnitts in Kauf genommen wurde, zumal die Zwischenwände seit ihrer Erbauung eine wirksame horizontale Abdichtung gleich über dem Kellerboden besaßen. Letzteres hatte eine Voruntersuchung des Mauerwerks durch einen Bauenschutzfachplaner erwiesen. Um den Keller vollständig als „*schwarze Wanne*“ wasserdicht auszuführen, hätten die alten Zwischenwände abgebrochen und nach dem Abdichten des Fußbodens wieder aufgemauert werden müssen, eine kostenintensive Maßnahme.

Eine weitere, kaum abzudichtende Stelle ist der Anschluss des Kellers an das alte Treppenhaus. Um hier Dichtheit zu erreichen, hätte die alte Kellertreppe, obwohl sie kaum beschädigt gewesen ist, gänzlich abgebrochen und erneuert werden müssen. Da dies unwirtschaftlich geworden wäre und der Keller außerdem nur als Lager- bzw. Abstellraum genutzt werden sollte, wurde die alte Treppe nicht abgebrochen, sondern bei weitem weniger aufwendig instandgesetzt. Um dennoch einbrechendes Wasser beseitigen zu können, wurden mehrere Pumpensümpfe über den Kellerboden verteilt an geeigneten Stellen installiert. Der Keller hat sich in der Folgezeit als weitgehend trocken erwiesen, geringfügig eindringendes Wasser konnte abgepumpt werden (Abb. 7.17).

Bei der Verwendung von zementgebundenen Abdichtungssystemen wie Sperrputze oder flexible Dichtungsschlämme im Inneren eines Gebäudes, in unserem Beispiel im Keller, treten häufig erhebliche Schwitz- oder Kondenswasserprobleme auf. Indem man zusätzlich auf die Innenabdichtung entweder einen Wärmedämmung verbesserten Putz oder einen Sanierputz/WTA aufbringt, kann der Schwitzwasseranfall durchaus reduziert bzw. unwirksam gemacht werden. Die Schwitzwasserproblematik schränkt jedoch die Nutzungsmöglichkeiten solcher Keller erheblich ein.

Abb. 7.18 Die Fugen des Sockelmauerwerks wurden mindestens 5 cm tief ausgeräumt



Bei der Instandsetzung eines alten Kellers kann jedenfalls nicht mit einem völlig trockenen Zustand gerechnet werden, eine gewisse Raumfeuchtigkeit darf durchaus bleiben. Dies entschied das Oberlandesgericht OLG Düsseldorf in seinem Urteil vom 30.4.1998- 5 U 137/97 (Weber 2000).

Ist das Mauerwerk von außen zugänglich, kann man die Abdichtung aber meistens auch nicht wie am Neubau problemlos außen anbringen. Die DIN 18 195 Teil 1–6 Bauwerksabdichtung weist selbst in einer Passage darauf hin, dass ihre Aussagen am Altbau nicht gelten: „*Die Norm gilt nicht für [...] nachträgliche Abdichtungen in der Bauwerkserhaltung oder in der Baudenkmalflege, es sei denn, es können hierfür Verfahren angewendet werden, die in dieser Norm beschrieben werden.*“

Es kommen hier häufig nicht genormte Verfahren in Anwendung, die aber dennoch zu den anerkannten Regeln der Technik zählen. Das Mauerwerk wird zunächst von außen freigegraben und anschließend gründlich mit Druckluftgeräten oder Drahtbürsten gereinigt. Dann werden die Mauerwerksfugen wenigstens bis zu 50 mm tief sauber ausgekratzt und anschließend ebenfalls mit Druckluft gereinigt. Es gibt dafür auch Strahlgeräte, die mit ihren feinen Düsen Mörtelfugen adaequat ausräumen können. Die Mauer wird sodann neu verfugt (Abb. 7.18).

Ist der Mauerstein nicht sehr hart oder gar bröselig, muss zuerst eine Verfestigungsmaßnahme durchgeführt werden. Handelt es sich um Backsteinmauerwerk, sollte in jedem Falle ein Spritzwurf als Putzträger aufgebracht werden. Die äußere Dichtungsschale baut man allerdings zumeist nicht mit von der DIN 18 195 genannten Dichtungsbahnen und -folien auf, sondern in der Praxis der nachträglichen Abdichtung haben sich einerseits flexible Dichtungsschlämme – es handelt sich dabei um Ein- oder Zweikomponentensysteme, die hauptsächlich aus Zement, Zuschlägen und einem Kunststoffanteil bestehen (Engelmann 2000) – und andererseits kunststoffmodifizierte Bitumendickbeschichtungen durchgesetzt. Das von der DIN 18 195 bevorzugte Verfahren besteht im Aufbringen einer ein- bzw. mehrlagigen Bitumenschweißbahn oder Kunststofffolie, wozu man allerdings immer eine glatte Mauerwerksoberfläche braucht; man bringt sie oftmals auf einer Vormauerung auf. Eine weitere, jedoch äußerst unwirtschaftliche Möglichkeit ist das Vorsetzen einer

Abb. 7.19 Die fertig mit einer Bitumen-Dickbeschichtung vertikal abgedichtete Kellerwand wurde anschließend mit einem Schutzvlies gegen Beschädigung gesichert



wasserdichten Betonwand aus Sperrbeton, insbesondere dann, wenn das Mauerwerk stark zerklüftet ist und ohnedies injiziert werden müssen. Im Zusammenhang mit drückendem Wasser ist eine Dränage ganz und gar überflüssig, denn die Abdichtung sorgt ganz allein für die geforderte Trockenheit. Trotzdem ist das Prinzip der doppelten Sicherheit sehr beliebt: Damit die Hose nicht rutscht, genügt ein Gürtel oder ein Hosenträger jeweils für sich allein, beides zusammen zu benutzen ist überflüssig. Vergleichbare überflüssige, doppelte Maßnahmen am Bau kosten dem Auftraggeber sehr viel Geld (Weber 1988, Abb. 7.19).

Vertikale Abdichtung bei nichtdrückendem Wasser und Erdfeuchte Wesentlich häufiger ist das kostengünstige Abdichten von Altbaukellern in diesem zweiten Fall. Auch hier müssen die Außenwände des Kellers zunächst freigeegraben werden. Steht kein ausreichender Arbeitsraum zur Verfügung, bieten verschiedene Firmen die Freilegung der Kelleraußenwand mit Hilfe eines Saugschlauches an. Allerdings kann dann nur mit Mühe eine Abdichtungsbahn fehlstellenfrei eingebracht und an einer mit Wasser mehr oder weniger gesäuberten Wand angeklebt werden. Vielleicht lässt sich eine flexible Dichtungsschlämme aufbringen. Eine Überprüfung der Maßnahme auf ihre Tauglichkeit hin ist jedenfalls allein schon wegen der Enge des zur Verfügung stehenden Raumes meist nicht möglich.

Dann muss das Mauerwerk wie bereits geschildert gründlich gereinigt werden. Obwohl man es in der einschlägigen Literatur häufig liest, empfiehlt es sich nicht, in der Baugrube mit einem Wasserstrahl zu arbeiten, weil dieser eine entsprechend aufwendige Wasserhaltung erfordert und zudem die Austrocknungszeit erhöht. Außerdem aktiviert der Wassereintrag im Mauerwerk befindliche bauschädliche Salze, die beim Abtrocknen an der Oberfläche auskristallisieren. Besser werden hier mechanische Reinigungsverfahren eingesetzt.

Im nächsten Arbeitsschritt werden die Mauerwerksfugen mindestens 20 mm tief ausgekratzt und neu verfugt. Fehl- und Schadstellen müssen möglichst mit dem gleichen Material, aus dem die Kellerwand besteht, ausgemauert und nicht etwa

Abb. 7.20 Alle Öffnungen im Mauerwerk müssen sorgfältig verschlossen werden



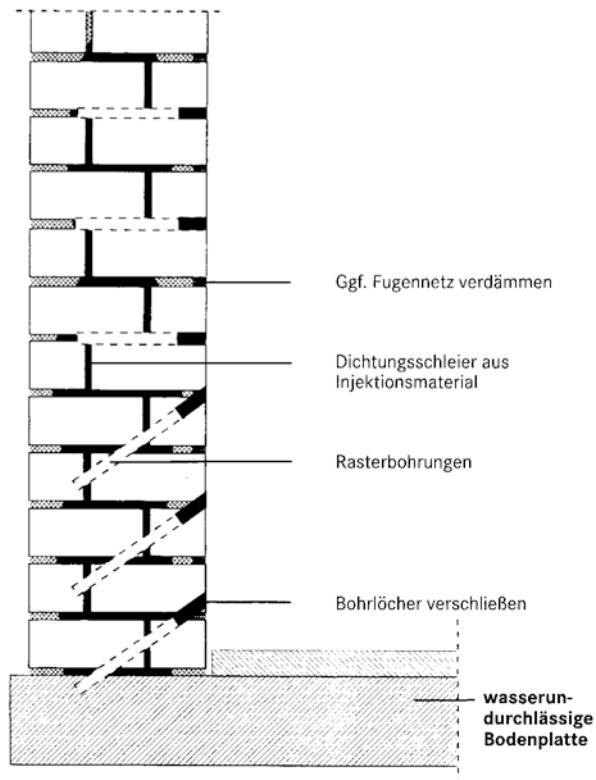
mit PU-Schäumen ausgespritzt werden. Als Bindemittel für den Mörtel empfiehlt sich hydraulischer Kalk bzw. Trasskalk. Die Mörtelindustrie stellt für diese Arbeiten sehr bewährte Werkstrockenmörtel zur Verfügung. Auch die Fugen werden mit einem solchen Mörtel ausgeworfen. Wenn die entsprechende Nachbehandlung des Trasskalkmörtels nach Herstellervorschrift abgeschlossen ist, wird die Kellerwand wiederum mit Trasskalkmörtel oder Kalkzementmörtel verputzt (Abb. 7.20).

Besitzt die Wand starke Vor- und Rücksprünge oder ist stark zerklüftet, dann empfiehlt sich eine eigene Vormauer- oder Betonschale, auf die flexible Dichtungsschlämme oder kunststoffmodifizierte Bitumendickbeschichtungen aufgebracht werden. Erfordert die neue Nutzung des Kellers eine äußere Wärmedämmung, so sollten unverrottbare Wärmedämmplatten, die sog. „*Perimeterdämmung*“, zum Einsatz kommen (Kap. 10.3) und durch ein entsprechendes Schutzvlies vor mechanischer Beschädigung beim Wiederverfüllen geschützt werden.

Seit einigen Jahren bieten sich zur nachträglichen vertikalen Abdichtung gegen nichtdrückendes Wasser oder Erdfeuchte, ja sogar bei dem Lastfall „*drückendes Wasser*“ Flächeninjektionen an, die sogenannte Schleierinjektion oder Vergelung entweder im Baugrund oder im Mauerwerk selbst (Kabrede 1998). Als Injektionsgut kommen Betonit, Silikat, Zement, selbstverständlich nur feuchteverträgliche EP-Harze, PUR-Harz und Acrylharzgel zur Anwendung. Es werden Bohrkanäle in Form einer Rasterbohrung durch oder in das Mauerwerk gebohrt. Auf diese werden die Packer von Ein- oder Mehrkomponenten-Injektionsgeräten gesetzt. Das Injektionsgut wird anschließend mit druckregulierenden und pulsionsarmen Pumpen in das Mauerwerk gepresst (Abb. 7.21).

Soll die Abdichtung im Mauerwerk selbst erfolgen, dann wird der Injektionsstoff derart in ihm plaziert, dass eine durchgehende Abdichtungsebene entsteht. Die Bohrlöcher werden ausgeblasen, die Packer montiert. Offene Fugen oder Mauerwerksklüfte müssen zuvor verpresst werden. Die Kontrolle des gleichmäßigen Materialflusses wird beispielsweise über einen offenen Packer erfolgen. Nachdem eine durchgehende Abdichtungsschicht im Mauerwerk entstanden ist, werden die Packer entfernt; die Löcher geschlossen. Wegen der Veränderung im Bauteil sind flankierende Maßnahmen wie bei allen chemischen Injektionen unerlässlich. Insbesondere

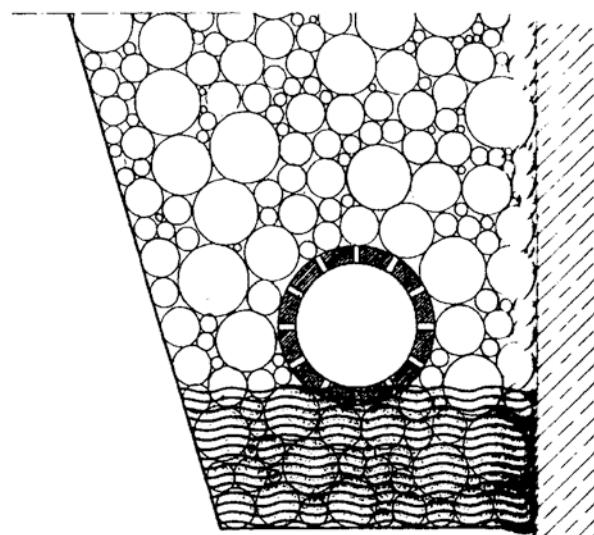
Abb. 7.21 Nachträgliche Abdichtung durch Flächeninjektion nach (Kabrede 1998)



die Bildung von Tauwasser an der Mauerwerksinnenfläche muss mit einem Sanierputz/WTA auf dieser Fläche abgesichert werden.

Soll die Abdichtung im Baugrund außerhalb des Mauerwerks entweder vor oder hinter ihm erfolgen, werden im Niederdruckinjektionsverfahren mit einem Druck ≤ 10 bar Abdichtungsebenen ausgebildet. Die wiederum rastermäßig angeordneten Bohrlöcher werden in Abhängigkeit des umgebenden Baugrunds gemäß seiner Haufwerksporigkeit derart eingebbracht, dass sie das Mauerwerk ganz durchbohren. Die Packer werden an der Innenseite des Mauerwerks montiert, ihre Austrittsöffnungen liegen jetzt auf der Außenseite desselben oder ragen darüber hinaus. Vor der eigentlichen Ausführung sollte stets eine Probeinjektion stattfinden. Dabei kann man das gewählte Bohrlochraster dahingehend überprüfen, ob tatsächlich ein zusammenhängender Injektionsschleier im Baugrund entsteht. Auch der erforderliche Druck kann so bestimmt werden. Die Eigenschaften des Injektionsstoffes sind auf die erforderlichen Gegebenheiten abzustimmen, es ist die Reaktionszeit, die Fließeigenschaft, der Materialverbrauch und anderes auf den Baugrund abzustimmen. Da die Injektionsstoffe selbstverständlich mit Grund- oder Sickerwasser in Verbindung treten, müssen sie umweltverträglich ausgebildet sein. Bei jeder Maßnahme zur Schleierinjektion ist daher eine vorherige Kontaktaufnahme mit den zuständi-

Abb. 7.22 Normgerechte Verlegung eines Dränagerohres ist am Altbau oft ungeeignet, weil sich unter der Dränage Wasser sammelt, das in das alte Fundament eindringt und es durchfeuchtet



gen unteren Umweltschutzbehörden dringend ans Herz zu legen. Außerdem muss die Kompetenz der ausführenden Firma sichergestellt sein.

7.1.3 Dränagen

Eine Dränage nach DIN 4095 kann oft allein für sich schon Nutzen bringen und ist deshalb immer dann als Trockenlegungsmaßnahme sehr geeignet, wenn die Kellerwand tief im Baugrund sitzt (Arendt und Seele 1999). In jedem Fall sollte sie die vertikale Abdichtung, wo immer es technisch sinnvoll ist, flankieren, dies insbesondere bei Abdichtungen gegen nichtdrückendes Wasser. Die DIN 18 195 Teil 4 verlangt bei allen Bauwerken in bindigen Böden und bei Hanglagen das Verlegen einer Dränage. Die Dränageleitung muss mindestens auf Frosttiefe, am besten auf Fundamenttiefe, womöglich sogar noch darunter verlegt werden und alle gefährdeten Bauteile umschließen. Mit Hilfe von Reinigungsschächten muss man Dränagen säubern können, indem sie mit fließendem Wasser durchspült werden. Oberhalb der Dränageleitung ist bis hinauf zur Geländehöhe eine Sickerpackung an der Wand anzubringen, damit das Oberflächenwasser zuverlässig in die Dränleitung gelangen kann. Die Dränage selbst ist in einer Filterschicht zu verlegen, welche sie vor Einschlammern und Versitzen schützt. Eine Dränageleitung muss stets ein ausreichendes Gefälle von 0,5 %, besser 1,0 % aufweisen. Deshalb verlegt man Dränageleitungen auf einer Sauberkeitsschicht, die am besten aus einem Unterbeton aus B 10 besteht. Mit ihm ist das Gefälle kontrollierbar auszurichten. Verlegt man die Dränage jedoch auf einer Sickerlage, wird man unter der Dränage ein Wasserreservoir schaffen, das beständig Wasser an das Fundament abgibt (Abb. 7.22).

Abb. 7.23 Aneinander angeschlossene Dränageschäfte ermöglichen ein rückstausicheres Abführen des Dränagewassers



Dränagen, die nicht fachgerecht eingebaut wurden, tragen eher zur Durchfeuchtung des Bauwerks bei. Dies insbesondere dann, wenn auch im Innenbereich eine Dränage angeordnet und an die äußere angeschlossen wurde, ohne dass das Wasser direkt abgepumpt wird. Bei Anschluss an eine vorhandene Grundwasserleitung dürfen wegen der Gefahr der Rückspülung beide Systeme auf keinen Fall miteinander verbunden werden. Auch der Anschluss der Dränage an die Abwasserleitung muss selbstverständlich ausgeschlossen bleiben, denn bei einem Abwasserrückstau würde die Dränage derart krass verschmutzt werden, dass ihre Löcher von da an kein Grundwasser mehr aufzunehmen in der Lage wären. Außerdem ist das Ableiten von Dränagewasser in die örtliche Kanalisation zumeist nicht gestattet. Sinnvoller ist die Ableitung des Dränagewassers in einen Regenwasserkanal, denn Dränagewasser ist gleichfalls Oberflächenwasser. Bei Rückstau führt aber auch diese Maßnahme zu einer unerwünschten Bewässerung des Mauerwerks (Abb. 7.23).

Dränagen schließt man – wo es geht – am besten an einen eigens für sie geschaffenen Sickerschacht an. In den Sickerschacht kann man eine Schwimmerpumpe einsetzen, die nicht versickerndes Dränagewasser beispielsweise in einen an ein Brauchwassersystem angeschlossene Zisterne pumpt. Von dort aus kann es zum Gartengießen oder haustechnische Verwendung finden. Diese haustechnischen Anlagen sind allerdings sehr störanfällig und müssen sicher gewartet werden. In Altstadtquartieren ist aber oft gar kein Platz für Sickerschäfte oder Zisternen vorhanden.

Grundsätzlich gilt, dass der nachträgliche Einbau von Dränagen samt den erforderlichen Rückstauverschlüssen gründlich geplant sein muss, um kein Bewässerungssystem für das Mauerwerk zu bauen. Die baupraktische Erfahrung hat gelehrt, dass Dränagen mit ihren Sickerschichten vor der Wand bei schlechter Ausführung und fehlender Wartung kontraproduktiv wirken. Auch die obere Abdeckung der Sickerpackung kann nicht immer dem Beiblatt zur DIN 18 195 entsprechend ausgeführt werden, da Plattenabdeckung zu einer höheren Spritzwasserbelastung am Fuß des Mauerwerks führt. Am besten hat sich nach unserer Erfahrung eine Grobkiespackung oder Schicht aus Zierkies als oberste Lage auf der Sickerpackung bewährt (s. Abb. 4.3).

7.1.4 Salzbekämpfung

Noch lange Zeit nach einer eigentlich erfolgreich und richtig ausgeführten Trockenlegungsmaßnahme wandern weiterhin bauschädliche Salze, wie oben in unserer Tab. 5.1 aufgelistet, an die Oberfläche des Mauerwerks, blühen am Feuchtesaum entlang weißgrau aus und wirken dort hygroskopisch, d. h. sie saugen Feuchtigkeit aus der Umgebung an, und setzen ihr Zerstörungswerk zunächst fort. Um die Trockenlegungsmaßnahmen endgültig erfolgreich gestalten zu können, bedarf es daher zusätzlicher Maßnahmen zur Entfernung des Salzes. „*Den überwiegenden Anteil an der Zerstörung des Mauerwerks haben die mit dem Wasser aufgenommenen und durch das Wasser gelösten Salze*“ (Arendt und Seele 1999).

Zur Salzbekämpfung sind in der Baupraxis eine Vielzahl von Techniken gebräuchlich, die sich mehr oder minder bewährt haben, aber auch von der Leichtgläubigkeit der sog. „*Sachkundigen*“ berichten. Da werden Salze durch angepriesene Wundermittel „*maskiert, neutralisiert oder gar vernichtet*“ (Weber 1988). Wirklich bewährte Salzbekämpfungsmethoden dagegen lassen sich in drei Gruppen erfassen:

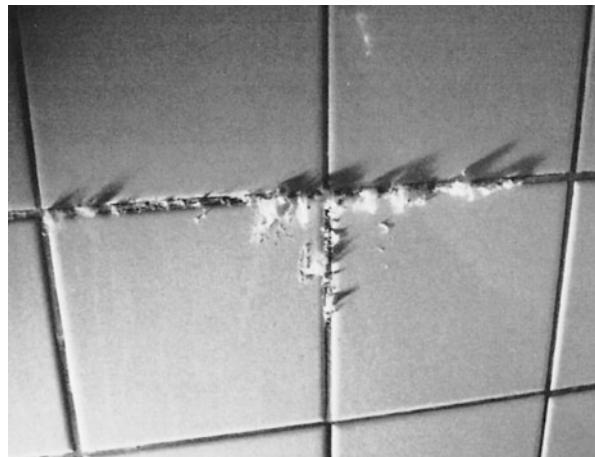
- mechanische Salzentfernung
- chemische Salzumwandlung
- physikalische und elektrophysikalische Salzbekämpfung

Zwischen diesen drei Gruppen sind selbstverständlich Übergänge fließend möglich.

Mechanische Salzentfernung Die wirksamste Methode zur Salzentfernung ist zugleich die einfachste. Man kehrt nämlich ganz einfach das an den Steinen haftende, ausgeblühte Salz von der Maueroberfläche ab. Allerdings kann in der Tat nur das Salz auf der Oberfläche auf diese Weise wirkungsvoll entfernt werden, das im Mauerwerksinneren gelöste bauschädliche Salz wird natürlich nicht erfasst. Beim Abkehren sollte man Stahlbürsten oder auch Hochdruckreiniger verwenden. Das abgebürstete Salz darf nicht in den Boden neben dem Mauerwerk gelangen, sondern muss auf Folien aufgefangen und fachgerecht entsorgt werden, um nicht erneut in den Salzkreislauf zu gelangen (Abb. 7.24).

Wenn das Mauerwerk verputzt ist und die Putzentfernung auch aus denkmalschützerischen Überlegungen heraus als unbedenklich apostrophiert wird, muss der Wandputz bis 1,00 m über dem mäandrierenden Verdunstungs- bzw. Ausblühungs-horizont abgeschlagen werden. Weil bei fast allen Mauersteinen der Wasser- und damit der Salztransport über die weichen Mörtelfugen erfolgt, darf man die Fugen keinesfalls übersehen. Sie müssen wiederum mindestens ca. 20 mm tief ausgekratzt werden, was oft sehr leicht mit einem Maurerhammer von Hand durchgeführt werden kann. Schneller und sauberer geht es mit einem Strahlgerät, dessen feine Düsen den mürben Fugenmörtel sehr sauber ausräumt. Zugleich damit hat man das Mauerwerk noch einmal von einer großen Salzlast befreit. Der in solchen Fällen bereits von den Salzen längst zermürbte Fugenmörtel lässt sich – wie gesagt – zumeist sehr leicht lösen oder bröselt teilweise von selbst heraus; es handelt sich also beileibe um keinen Verlust von Originalsubstanz, sondern um Bauschutt. Hier gibt es selbst für

Abb. 7.24 Das Salz dringt bereits aus den Fliesenfugen. Es kann abgebürstet werden



den ehrgeizigsten Denkmalschützer nichts mehr zu erhalten. Schließlich wird die gesamte Wand noch einmal gründlich abgekehrt.

Steht zu befürchten, dass im Zuge des Austrocknens weiteres Salz an die Mauerwerksoberfläche gelangt und dort auskristallisiert, sollte das Abkehren in längeren Zeitabständen mehrfach wiederholt werden. Hat die Analyse der Salze ergeben, dass der gesamte Mauerquerschnitt stark salzbelastet ist, so hilft das Abkehren allerdings nicht viel, denn es würde viel zu lange dauern, bis eine befriedigend salzarme Oberfläche erzielt wird.

Dann sollten andere Verfahren zur Salzentfernung den Vorzug erhalten. Auf keinen Fall darf ohne wirksame Maßnahmen zu ergreifen einfach zugesehen werden, wie die Salzbildung voranschreitet, denn die Versalzung und die damit verbundene Zerstörung des Mauerwerks nimmt nicht linear sondern annähernd logarithmisch zu: Eine Entsalzung einige Jahre später könnte für das Mauerwerk bereits zu spät sein, es ist dann nicht mehr zu retten.

Chemische Salzumwandlung Diese Vorgehensweise führt nicht zu einer Entfernung der bauschädlichen Salze, sondern es werden dabei leicht lösliche Salze mit Hilfe einer applizierten Chemikalie, einem sog. „Salz-umwandler“ in schwerlösliche oder gar in unlösliche Verbindungen umgewandelt, die dann dem Mauerwerk nicht mehr schaden können (Abb. 7.25).

In der Baupraxis hat sich jedoch die Salzumwandlung nicht immer als so anwendungsfreundlich herausgestellt, wie die Theorie es erwarten ließ. Zum einen befindet sich in einem historischen Mauerwerk immer eine Vielzahl von bauschädlichen Salzen zugleich, hauptsächlich Chloride, Sulfate, Carbonate, Nitrate, und nicht nur bloß ein einziges. Keine Chemikalie kann aber mit allen Salzen in der gewünschten, sie für das Mauerwerk unschädlich machenden Weise reagieren; man wird sich also auf die jeweils schädlichsten Salze konzentrieren müssen. Außerdem entziehen sich die besonders zerstörerisch wirkenden Nitrate ohnedies der Umwandlung, da es keine schwerlöslichen Nitratverbindungen gibt (Weber 1988).

Abb. 7.25 Bauschädliche Salze zerstören die Wandoberfläche. Hier kann Salzumwandlung die Lösung des Problems sein



Zum anderen sind die Produkte, die durch Salzumwandlung entstehen, oft sehr giftig. Ergibt beispielsweise die Salzanalyse im wesentlichen das Vorhandensein von löslichen Sulfat- und Chloridverbindungen, bietet sich eine Behandlung des Mauerwerks mit einer Bleihexafluorosilikat-Lösung an. Diese Chemikalie reagiert mit den Sulfaten und Chloriden in komplexer Reaktion unter Bildung von schwer- oder unlöslichen Produkten, ist aber sehr giftig. Das Besprühen des Mauerwerks kann also nur im Schutzzug und unter einer schützenden, das Verwehen des Sprühnebels verhindernde Gerüstabdeckung vorgenommen werden. Genauso steht es mit dem Bariumsulfat, das außerdem noch in leicht lösliche Salze wie Natriumchlorid umgewandelt wird.

Daraus ergibt sich ein weiteres Anwendungsproblem: Man muss nämlich die genaue Menge der jeweiligen Salze im Mauerwerk kennen, um gerade so viel von der Salz bekämpfenden Chemikalie einzutragen, wie tatsächlich in eine unschädliche Verbindung umgewandelt werden kann, ohne dass gleichzeitig andere leicht lösliche Salze gebildet werden oder Reste der hochgiftigen Substanzen am Mauerwerk haften bleiben. Die Menge des Salzumwandlers muss der Salzmenge entsprechen, zugegeben, eine sehr theoretische Forderung, die in der Praxis in keiner Weise erreicht werden wird.

Eine chemische Umwandlung wird außerdem nur einen Teil und zwar nur den oberflächennahen Teil der bauschädlichen Salze erreichen. Das ergibt sich schon aus der praktischen Anwendung heraus: die Salzumwandler werden auf das Mauerwerk aufgestrichen oder aufgesprüht und können nur wenige Zentimeter in das mehr oder weniger saugende Mauerwerk eindringen. Deshalb wird manchmal auch empfohlen, das Mauerwerk aufzubohren und den Salzumwandler zu injizieren, was die Maßnahme selbstverständlich erheblich verteuert und den Erfolg nicht wesentlich verbessert.

Häufig werden Chemikalien auch als „*Salzbremse*“ zur Oberflächenverdichtung eingesetzt. Dabei können entweder verdichtende oder hydrophobierende Mittel verwendet werden. Verdichtende Mittel, z. B. Produkte auf Fluatbasis oder Kaliumsilicat, halten die Salze freilich nur zurück, d. h. diese kristallisieren statt an der

Oberfläche in einer geringen Tiefe im Mauerwerk darunter. Dort wird allerdings ebenfalls ein Kristallisationsdruck aufgebaut. Die Maßnahme kann demzufolge Salzschäden höchstens verzögern, jedoch keineswegs verhindern.

Ein anderes Verfahren stellt das Hydrophobieren eines salzverseuchten Mauerwerks dar. Dies wird meistens im Zusammenhang mit dem Auftrag von Sanierputz/WTA ausgeführt und soll das Einwandern von Salzen in den frisch aufgetragenen Putz verhindern. Dabei ergibt sich freilich eine arge Verschlechterung der Haftung des Putzes an der Mauerwerksoberfläche, was die Wirksamkeit dieses Verfahrens stark einschränkt. Solche Anwendungen sollten jedoch immer von einem erfahrenen Bautenschutz-Fachmann begleitet werden, denn eine fachlich nicht überprüfte Anwendung wird in der Regel scheitern.

Bei chemischen Verfahren zur Salzumwandlung ist zu beachten:

- Sie sollen nur nach genauer Salzbestimmung gewählt werden.
- Es findet keine Entsalzung des Mauerwerks statt.
- Es werden nur oberflächennahe Salze erfasst und umgewandelt.
- Die Salzumwandler sind zumeist sehr toxisch und daher bei ihrem Einsatz auf der Baustelle gefährlich.
- Die Chemikalien können zusätzliche, leicht lösliche, bauschädliche Salze bilden. Sie schaden dann mehr als sie nutzen.
- Eine verdichtete Oberfläche kann durch den sich darunter aufbauende Kristallisations- bzw. Hydratationsdruck der Salze abgesprengt werden.
- Hydrophobie vermindert die Putzhaftung am Mauerwerk.

Physikalische und elektrophysikalische Salzbekämpfung Bei diesen Verfahren handelt es sich zum einen um das Anlegen von Kompressen, Opferputzen und Kompressenputzen auf dem Mauerwerk, zum anderen um Maßnahmen des Salzausspülens und schließlich um die Salzentfernung mit Hilfe von elektrischen Feldern, die am Mauerwerk angelegt werden.

Die Entsalzung mit Hilfe von Kompressen ist eine seit langem bekannte Methode, die auch in der Denkmalpflege anerkannt ist. Eine feuchte Komresse, zumeist auf Zellulosebasis, wird auf die Oberfläche des Mauerwerks aufgelegt. Dabei wird die Verdunstungszone von der Oberfläche des Mauerwerks weg hinein in die Komresse verlegt und die gelösten, bauschädlichen Salze kristallisieren statt in der Wand in dieser neuen Verdunstungszone. Wenn die Komresse genügend voll Salz ist, wird sie abgenommen und entsorgt. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis die Salzmenge im Mauerwerk ausreichend abgenommen hat. Soweit die einfache Theorie.

In der Praxis stellt sich das Anlegen von Kompressen jedoch viel schwieriger dar. Da die Komresse feucht sein muss, kann sie bei zu viel Feuchte die Mauerwerksoberfläche derart annässen, dass die Salze ins Wandinnere diffundieren. Andererseits muss die Komresse so dick sein, dass sie eine ausreichende Speicherkapazität besitzt. Dadurch aber wird sie vor Ort sehr unhandlich. Außerdem sollten Kompressen nicht erst im trockenen, sondern noch im nassen Zustand abgenommen

werden, um zu verhindern, dass sich die Salze in der trockenen Komresse wieder in Richtung des inzwischen feuchten Mauerwerks bewegen. Es bedarf also eines großen Überwachungsaufwands an der Baustelle. Schließlich können Kompressen niemals vollflächigen Kontakt mit der gesamten Mauerwerksoberfläche herstellen, in den Randbereichen zwischen der Komresse und der freien Wandoberfläche kommt es dann zum verstärkten Salzeintrag. Außerdem ist die Oberfläche eines historischen Mauerwerks niemals planeben, sondern durch Löcher, Risse, Krater, lösliche Schuppen oder absandende Bereiche geschädigt. Daher verlangt in solchen Fällen das Anlegen von Kompressen zuvor eine Oberflächenebnung des Mauerwerks. Dazu kommt, dass die Entsalzung mit Kompressen sehr teuer ist und sich nur zur Anwendung auf schützenswerten Mauerwerksbereichen oder gar nur auf Steinplastiken und Bildhauerwerken beschränken wird. Wieder ist hoher baupraktischer Sachverstand bzw. der eines Restaurators gefragt. Selbst bei einer umfassenden Voruntersuchung des zu entsalzenden Mauerwerks oder seiner Teile wird man nicht umhin kommen, Flächen zur Bemusterung anzulegen, um dort die Wirksamkeit der gewählten Kompressen zu testen. Erst auf diese Weise wird der erforderliche Zeitaufwand und die Zahl der notwendigen Wiederholungen der Kompressen festzustellen sein.

Um dem Nachteil der kleinfächigen Kompressen sowie dem häufig gestörten, innigen Verbund zwischen ihnen und dem zu entsalzenden Mauerwerk wirksam zu begegnen, hat man die sog. „*Opferputze*“ entwickelt. Es handelt sich um saugfähige Putze, in die nach dem Aufbringen das Salz aus dem Mauerwerk einwandern soll. Nach einer gewissen Standzeit werden solche Putze wieder abgeschlagen und entsorgt. Der Putz wird gleichsam geopfert. Die Wirkung eines „*Opferputzes*“ kann sich aber nur in derartigen mineralischen Baustoffen entfalten, die eine möglichst hohe Wasserleitfähigkeit oder eine schnelle Saugfähigkeit besitzen, wie das vor allem bei reinem Kalk der Fall ist. Daher spricht man bei den Opferputzen auch von „*Kalkmörtelkompressen*“. Wieder ist Theorie und Praxis gänzlich verschieden, denn das theoretisch richtig Überlegte funktioniert in der Baupraxis nur unzureichend. Denn ein Opferputz wirkt nur dann zufriedenstellend, wenn das Mauerwerk bereits ausreichend trockengelegt wurde und somit der Salznachschub dauerhaft unterbunden ist. Der Kalkmörtel trocknet außerdem rasch, so dass es bald zu einer Salzblockade in seinen Poren kommt. Der Salzeintrag blockiert sich gleichsam selbst und schränkt die Wirkung des Opferputzes stark ein (Venzmer 2001).

Deshalb hat die Industrie chemisch beeinflusste Putze entwickelt, die als Kompressenputze im Handel sind. Ihre Kapillarität und ihr großes Porenvolumen ermöglichen eine langfristige Salzaufnahme. Sie saugen in der Tat eine vordem nicht erzielbar gewesene Salzmenge in sich auf, ohne dass dabei der gesamte Kompressenputz sofort wieder zerstört würde. Sie sind dennoch als „*Opferputz*“ ausgelegt. Im Gegensatz zum Sanierputz/WTA sind ihre Porenwände nur wenig bis gar nicht hydrophobierend eingestellt, damit die Abweisung des zum Einwandern der Salzlösungen unbedingt erforderlichen Wassers deutlich verringert wird. Außerdem müssen Kompressenputze selbstverständlich ein salzresistentes Bindemittel verwenden. Schließlich sollen sie nur eine geringe Endfestigkeit entwickeln, denn sie sind ja zum Wiederabschlagen vorgesehen.

Abb. 7.26 Eine unfachmännisch angebrachte Folienrinne ist unbrauchbar und wird ablaufendes, salziges Wasser nicht auffangen können



Wie lange nun ein Kompressenputz an der Maueroberfläche haften sollte, ist nicht ganz leicht zu sagen. Am einfachsten lässt man sich von seinem Aussehen leiten. Die Ansetzzeit bewegt sich in der Praxis zwischen mindestens sechs Monaten und bis zu zwei Jahren (Arendt und Seele 1999).

Das Ausspülen von Salzen aus der Mauerwerksoberfläche wird bei der Entfernung von Salzausblühungen auf Klinkerfassaden seit langem erfolgreich angewendet. Bei historischem Mauerwerk stellen sich dieser Technologie einige Hindernisse entgegen, denn das Mauerwerk muss so lange bewässert werden, bis nachweislich ein großer Teil der Salze ausgewaschen ist. Am lange Zeit von außen nass gehaltenen Mauerwerk kann aber die umgekehrte Salzwanderung eintreten: statt nach außen saugt die Nässe die bauschädlichen Salze nach innen hinein. Das ständig laufende Wasser muss selbstverständlich fachgerecht aufgefangen und entsorgt werden, bevor es in den Baugrund einsickert, denn sonst beginnt ja der Salzkreislauf von neuem. Also wird man um teuere Folienrinnen und dauerhaft angebrachte Absaugevorrichtungen nicht umhin kommen und sie intensiv warten müssen. Wieder wird nur das Salz auf der Oberfläche bzw. aus einer oberflächennahen Schicht entfernt (Abb. 7.26).

Deshalb wird das Spülverfahren auch unter Druck eingesetzt. Das Wasser wird dabei in die zuvor aufgebohrten Mauerwerksfugen eingepresst. Es muss jedoch auf jeden Fall weit hinter die salzgeschädigte Oberfläche gelangen, um das Salz nach außen transportieren zu können. Wieder handelt es sich um eine teuere Maßnahme, die sich jeweils auf kleinere Flächen beschränken wird. Eine große baupraktische Bedeutung werden Spülverfahren am historischen Mauerwerk wahrscheinlich nie-mals bekommen.

Die elektrophysikalischen Entsalzungsverfahren hängen sehr eng mit der Trockenlegung mit Hilfe eines elektrischen Feldes zusammen. Auch hierzu werden in bestimmten Abständen Elektroden (Anoden) ins Mauerwerk eingesetzt, die miteinander elektrisch leitend verbunden werden. Das negative Potential wird an einen Erderstab oder an eine Kathode angelegt. Die gesamte Anlage wird nunmehr mit Gleichstrom versorgt, wobei der elektrische Strom zusammen mit dem Wasser positiv geladene Teilchen zur Kathode und negativ geladene zur Anode transportiert. Im Wasser werden dabei insbesondere die gelösten Salze mitgenommen, die an den Elektroden

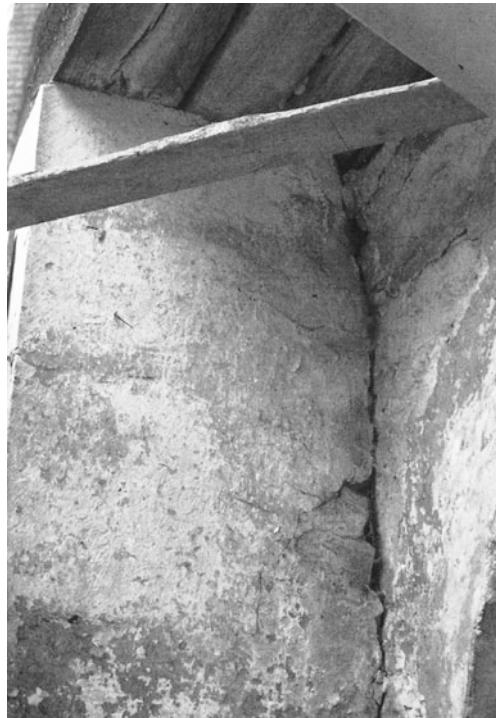
auskristallisieren und sich an der dortigen Mauerwerksoberfläche anreichern. Wieder eine Methode, die in der Theorie erfolgverheißend klingt, aber in der Praxis dann doch weniger gut wirkt. Zwei praktische Verfahren haben sich dennoch bis heute am Markt durchgesetzt: Das AET-Verfahren und das der Firma Kerasan aus Wien. Bislang scheint ihre Wirksamkeit bei der Salzbekämpfung unbestritten zu sein. Beide Verfahren wurden nämlich auf ihre Eignung hin mehrfach geprüft und beide haben in der Tat Salze in durchaus befriedigender Menge in relativ kurzer Zeit zu den Elektroden hin transportiert. Ob dabei allerdings nur Prozesse der Salzumlagerung oder echte Salzverringerung stattgefunden haben, können diese Einzelüberprüfungen letztlich nicht klären. Es wird also noch weiterer Kontrollen bedürfen, bis die Wirksamkeit zweifelsfrei feststeht. Gerade in der Denkmalpflege, wo es auf die Erhaltung des originalen Mauerwerks ankommt, wären einwandfrei funktionierende elektrophysikalische Technologien zur Mauerwerksentsalzung äußerst wünschenswert.

7.2 Nachträgliches Wiederherstellen von Standsicherheit und Tragfähigkeit

Ein weiteres, häufig auch von Fachleuten nicht beherrschtes Tätigkeitsfeld ist die Wiederherstellung der Tragfähigkeit gerissenen, gelockerten, zerklüfteten, schiefestehenden oder ausgebauchten Mauerwerks. Hier gibt es im wesentlichen drei wirksame und bewährte Verfahren: Unterfangen, Verpressen (Injizieren) und Vernadeln, wobei des Vernadeln mit dem Vorspannen der Stähle einhergehen kann. Gerade das Einbringen von Zugankern aus Eisen oder Stahl zur Erhöhung der Tragfähigkeit des Mauerwerks haben schon die alten Baumeister gekannt und erfolgreich angewendet (Maier 1992/1993). Auch das Verpressen von Hohlräumen mit geeigneten Mörteln stellt eine altbewährte Technik der Mauerwerksinstandsetzung dar, wenn auch heute die Baustoffchemie mineralische Suspensionen und Verpressmörtel herstellt, deren Klebefähigkeit ein Vielfaches der herkömmlichen Mörtel ausmacht. Insbesondere wenn tragfähige Fundamente fehlen, bleibt nichts weiter übrig, als die Wand abschnittsweise mit Mauerwerk oder Beton zu unterfangen, wobei diese Maßnahme mit einer neuen Abdichtungsschicht Hand in Hand gehen kann.

Um solche Schäden zu beheben und dem Mauerwerk wieder neue Kräfte zu geben, hat die Bauingenieurkunst in Verbindung mit den Werkstoffwissenschaften und der Industrie Techniken zur Instandsetzung entwickelt, die sich im wesentlichen in folgende, bereits genannte Verfahren wie Unterfangen, Injizieren bzw. Verpressen und Vernadeln sowie Vorspannen einordnen lassen (Wenzel et al. 2000). Alle diese, zumeist aus der Betontechnologie stammenden Techniken greifen tief in die Originalsubstanz des Mauerwerks ein und sind deshalb bei unter Denkmalschutz stehenden Objekten eingehend mit der Denkmalbehörde abzusprechen. Die für solche Instandsetzungsverfahren erforderlichen Eingriffe in das Mauerwerk sind fast immer mit Bohrvorgängen verbunden. Das dabei anfallende Wasser spült reichlich Bohrklein sowie Bindemittel aus und die zumeist mit dem Schlagbohren verbundene Erschütterung wird einzelne lockere Steine herausfallen lassen. Die ausgespülten Bindemittel verfärben überdies die Mauerwerksoberfläche, die durch das

Abb. 7.27 Altmorschen, Kloster Heydau. Infolge Absenkung abgerissener Stützpfeiler der gotischen Kirche



Wasser gelösten Salze führen zu Ausblühungen. Beim Injizieren kann das Verpressgut unkontrolliert an der Oberfläche austreten, beim Vernadeln kann eine fehlerhafte Umhüllung der Stahlnadel zu langfristigen Korrosionsschäden und damit zu Rostsprengungen führen. Schließlich kann das Vorspannen Mauerwerksteile derart überlasten, dass neue Gefügeschäden entstehen. Das unsachgemäße oder unkontrollierte Anwenden aller dieser Techniken kann also sogar der Grund für irreversiblen Folgeschäden am Mauerwerk sein. Davor soll hier nachdrücklich gewarnt werden.

7.2.1 Unterfangen nicht mehr tragfähigen Mauerwerks

Da in der Vergangenheit Mauerwerk oftmals unzureichend fundiert worden ist, z. B. sehr häufig bei Bauernhäusern, aber auch bei Stadtmauern, Kirchen, je sogar manchmal bei sonst ausgesprochen solide errichteten Schlossflügeln, muss das Mauerwerk nachträglich tragfähig unterfangen werden, um Setzungsschäden zu vermeiden. Aber selbst bei solchen Mauerwerken, deren Fundamente ursprünglich durch massive Holzpfahlgründungen oder durch geeignete Balkenroste tragfähig konstruiert waren, kann eine Unterfangung notwendig werden, wenn die Holzkonstruktion inzwischen vermorscht oder vermulmt ist. Ein weiterer, häufiger Grund für eine Unterfangungsmaßnahme wird selbstverständlich durch die neue Nutzungsanforderung an das Mauerwerk entstehen (Abb. 7.27).



Abb. 7.28 Ansbach, Altstadt um 1720. (Rekonstruktionszeichnung) Durch den Einbau einer Kanalisation wurde das Grundwasser abgesenkt

Unterfangungen gehen in der Regel wie das Mauerwerksaustauschen unspektakulär in kleinen Schritten vonstatten. Gleichwohl können sie auch derart beeindrucken, dass sie auf ein breites öffentliches Interesse stoßen. Zwei Beispiele für solche aufwendige Unterfangungen seien hier angeführt:

Eine besonders spektakuläre und interessante, weil ingenieurmäßig anspruchsvolle und technisch höchst schwierige Maßnahme stellte die Unterfangung der baufällig gewordenen Gebäudeflügel des Ansbacher Schlosses in den Jahren von 1925 bis 1930 dar. Es handelte sich um den Südost- und den östlichen Teil des Nordostflügels eines von Gabriel de Gabrieli von 1713 bis 1716 errichteten barocken Anbaues an das alte Renaissanceschloss, den der Baumeister im nassen Baugrund auf Holzpfählen errichtet hatte. Infolge der zunehmend intensiven Nutzung des Schlossgebäudes durch die Regierung von Mittelfranken seit der Mitte des 19. Jahrhunderts ohne zusätzliche Verbesserung der Sanitäreinrichtung – die im Schlosshof unterirdisch eingebauten Ausfaulbehälter quollen schier über – wurde das Fundamentholz und der Mauerwerksfuß durch menschlichen Kot und Urin, also durch Sulfate, brutal angegriffen und verfaulte geradewegs. Das Verlegen einer städtischen Kanalisation in der nahe beim Schloss liegenden Altstadt in den Jahren um 1920 hatte außerdem ungewollt das Grundwasser abgesenkt. Die Kanalrohre wurden damals wie heute in Sand eingebettet und wirkten demzufolge wie eine großflächige Dränage (Abb. 7.28).

Bald standen die hölzernen Fundamentpfähle bis zu einem Meter im Trockenem bzw. in von Beamtenexkrementen verseuchtem Erdreich. Bei den Hölzern handelte es sich um Tannen- und Fichtenstämme, die ohne das feuchte Milieu offensichtlich rasch vermulmten. Als das Landbauamt Ansbach den zerstörten Bereich öffnen ließ, stank das gesamte Fundament entsetzlich und hatte nach Aussage des zuständigen Ingenieurs die Tragfähigkeit von „Quark“ erreicht (Maier 2005). Die Backsteinmauern hatten sich infolgedessen gesetzt und waren derart zerborsten, dass die Schlossstreppe für den öffentlichen Besucherverkehr gesperrt werden musste. Der gesamte ca. 45 m lange Südostflügel des Schlosses war baufällig geworden. Die Oberste Baubehörde in München überlegte bei der Größe des Schadens allen Ernstes, dieses barocke Juwel der Baukunst wegen jener starken Risse im Mauerwerk abreißen zu lassen. Doch dann entschloss sich die Bayerische Staatsregierung doch noch, den Schaden mit einer damals ganz modernen, noch kaum erprobten Technik zu beheben. Dabei musste sowohl das vermulmte Holz in seinem oberen Bereich als auch das darauf ruhende, jedoch verfaulte Backsteinmauerwerk in seinem unteren Bereich, beides bis zum gesunden Kern hin, jeweils mehr als 1,00 m hoch herausgenommen und das aufgehende Mauerwerk aus einem von der Industrie noch nicht sehr lange zur Verfügung gestellten, hochsulfatbeständigem Hochofenzement hergestellten Beton unterfangen werden. Wegen der hohen Lasten, die abgestützt werden mussten, wurden entsprechend kleine Unterfangungsabschnitte festgelegt und das nicht mehr tragfähige Material vorsichtig Abschnitt für Abschnitt herausgenommen. Dazu war eine aufwendige Wasserhaltung erforderlich, denn die Fachleute waren sich darüber einig, dass die gesunden Teile der Baumstämme weiterhin unter Wasser gehalten werden sollten, um sie dauerhaft tragfähig erhalten zu können. Andererseits band man jetzt das Schlossgebäude an die städtische Kanalisation an, um dem unhygienischen Übelstand ebenfalls gründlich abzuhelfen. Die Unterfangungsarbeiten dauerten insgesamt sechs Jahre und waren mit ungeheuer hohen Kosten verbunden. Erstaunlicherweise musste die Beamtenchaft während der durchaus riskanten Maßnahme zu keiner Zeit das Schlossgebäude räumen (Abb. 7.29).

Um das Fundamentholz beständig unter Wasser zu halten, wurde ein Pumpensystem angeordnet, das immer dann automatisch Wasser von der nahegelegenen Rezat in den Fundamentbereich pumpte, wenn das Grundwasser unter einen bestimmten Pegelstand zu sinken drohte (Brannekämper 1966). Die Bauingenieure des Staatlichen Hochbauamtes Ansbach kontrollieren diesen Wasserpegel und die dazugehörigen Pumpen heute noch immer. Die Unterfangungsmaßnahme von damals hat sich dadurch, dass diese Residenz als eines der ganz wenigen deutschen Barockschlösser vor den Bomben des Zweiten Weltkriegs verschont blieb, unverhofft mehr als bezahlt gemacht (Abb. 7.30).

Ein zweites, wohl noch spektakuläreres Unterfangsvorhaben sei ebenfalls kurz berichtet:

Die Stadtpfarrkirche St. Martin in Landshut besitzt den höchsten Backsteinkirchturm der Welt mit 130,6 m Höhe, der zwischen 1460 und 1500 erbaut wurde. Dieser Turm begann sich in den Jahren nach 1970 schief zu stellen (Abb. 7.31).

Offenbar bildeten die Tiefgaragen der umliegenden Kaufhäuser in der Altstadt mit den dafür notwendig gewordenen Eingriffen in den Grundwasserbestand und

Abb. 7.29 Ansbach, Residenzschloss. Die verfaulten Köpfe der Fundamentpfähle mussten mannshoch abschnitten werden



zugleich in den Baugrund die Ursache für seine zunehmende Instabilität. Ende der achtziger Jahre war die Neigung des Backsteinturms derart gefährlich eingestuft worden, dass sich die Bauverwaltung zu einer sehr aufwendigen und nur mit ausfeilter Elektronik und Informatik möglichen Unterfangung des Kirchturms entschloss. Die Turmfundamente wurden freigelegt und ein Netz aus starken Stahlträgern eingeschoben, bis sich schließlich eine zusammenhängende tragfähige Plattform aus Stahl bildete. Die Enden der Träger wurden auf hydraulische Pumpen aufgelegt, die wiederum auf gewaltigen Stahlbetonfundamenten aufsaßen. Nun begann die mit hochsensiblen elektronischen Messgeräten ausgestattete Hydraulik computergesteuert ganz langsam, Millimeter für Millimeter das Turmmauerwerk anzuheben und gerade zu richten, bis der Turm wieder exakt senkrecht stand. Die gesamte Maßnahme wurde mit Hilfe der meßtechnischen Regelungen rissefrei durchgeführt! Danach wurde das Backsteinmauerwerk kraftschlüssig unterklett und seine Fugen schwindsicher mit vergütetem Mörtel geschlossen. Die Stahlkonstruktion blieb im Fundament und kann zukünftigen, weiteren Schieflagen Einhalt gebieten. Diese großartige Ingenieurleistung fand ungeteiltes Medieninteresse und große Aufmerksamkeit europaweit (Abb. 7.32).

Beide Unterfangungen zeigen, wozu moderne Technik in der Lage ist. Zumeist aber finden die Unterfangungsarbeiten in weit weniger spektakulären Größenord-



Abb. 7.30 Ansbach, Residenzschloss. Ansicht der 1925–1930 unterfangenen Südostfassade heute

Abb. 7.31 Landshut, Stadtkirche St. Martin. Höchster gotischer Backsteinkirchturm der Welt



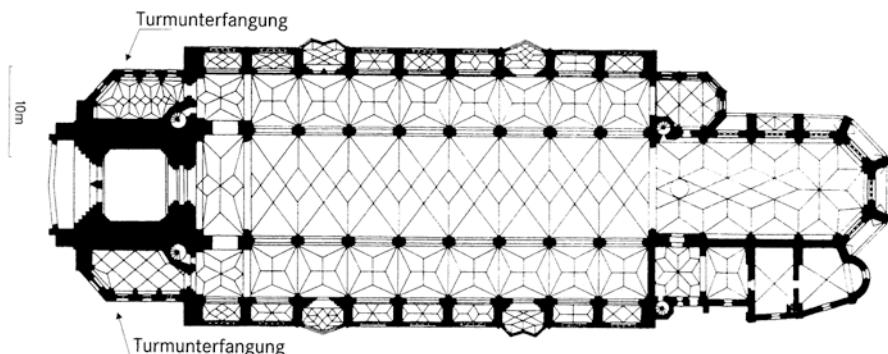


Abb. 7.32 Landshut, Stadtkirche St. Martin. Grundriss mit Eintrag der Turmunterfangungen

Abb. 7.33 Abschnittsweise Mauerwerksunterfangung mit Beton



nungen statt. Wie in den vorgestellten Fällen ist die moderne Nutzung des Gebäudes selbst oder solcher in der Nachbarschaft fast immer die Ursache für Unterfangungsmaßnahmen. Oft soll bloß ein Fußboden tiefer als bisher gelegt oder ein bislang nicht unterkellerter Baukörper mit einem Keller ausgestattet werden (Abb. 7.33).

Noch öfter soll direkt neben ein ebenerdiges historisches Mauerwerk ein Neubau mit einem tiefen Keller gesetzt werden. Einen weiteren Grund für eine Unterfangung kann eine Fundamentverstärkung bilden, die erforderlich wird, weil durch Einbauten verbunden mit neuem Lasteintrag in ein historisches Gebäude dessen Fundamente nicht mehr ausreichend tragfähig sind, oder es soll aufgestockt werden.

Zum Unterfangen werden Betone aus Spezialzementen eingesetzt, die sich mit den jeweilig anstehenden Materialien unter dem historischen Mauerwerk vertragen müssen. Unter einer solchen Mauer findet sich zumeist kein normaler Baugrund, sondern humose Erde, Mauer- oder Haushaltsschutt aus vergangenen Epochen, der meist zum Einebnen der Aufstandsfläche für das Mauerwerk gedient hat, oder manchmal auch historische Gräber. Dann muss unbedingt ein Archäologe das Grab freilegen und die Grabaustattung retten. In dem genannten Schutt finden sich häufig

Abb. 7.34 Villa in Glauchau in unsaniertem Zustand. Neben dem Treppenhaus befindet sich ein ebenfalls später angebauter Außenkamin



Tonscherben, die für eine verlässliche Datierung des Mauerwerks den Terminus post quem abgeben: Also niemals solch historischen Schutt achtlos wegwerfen!

Alle Unterfangungen erfordern fachgerechte Unterstützung des aufgehenden Mauerwerks, um Setzungsrisse zu vermeiden. Diese sollten niemals vom örtlichen Bauleiter, sondern immer von einem Tragwerksplaner berechnet und angegeben werden. Auch dazu ein praktisches Beispiel:

An einer Fabrikantenvilla in Glauchau/Sachsen aus der Gründerzeit um 1900 wurde vom Verfasser im Rahmen seiner Voruntersuchungen festgestellt, dass das Treppenhaus aus Backsteinmauerwerk als separater Baukörper drei Geschosse hoch an die Villa nachträglich angebaut worden war. Dieser Baukörper war im Gegensatz zur übrigen Villa nicht unterkellert, seine gemauerten Fundamente lagen etwa auf halber Kellerhöhe (Abb. 7.34).

Der Keller sollte als Büro genutzt werden und weil von außen drückendes Grundwasser festgestellt worden war, ordnete der Verfasser eine vertikale Außenabdichtung des Kellermauerwerks in Verbindung mit einer Dränage an. Da aber der Höhenunterschied im Bereich des Treppenhauses eine durchgehende Abdichtung und vor allem eine gleichmäßig im Gefälle verlegte Dränage nicht zuließ, musste das Treppenhaus unterfangen werden. Dazu beauftragte der Verfasser eine Baufirma, welche angeblich ausreichende Erfahrung mit Unterfangungen besaß. Um sicher

Abb. 7.35 Villa in Glau-chau. Völlig unbrauchbare und gefährlich schwache Abstützung für die Unterfan-gung des Treppenhauses



zu gehen, überprüfte der Verfasser die von der Firma verantworteten Abstützungen und traute seinen Augen nicht, als er die schwachen Holzstangen sah, die den Baukörper während der Unterfangung hätten abstützen sollen. Da die Grabarbeiten am Treppenhaus bereits begonnen hatten, mussten sie sofort eingestellt werden, denn die Baufälligkeit des Treppenhauses drohte (Abb. 7.35).

Erst als ein Statiker mächtige Abstützungsbalken angeordnet hatte, konnten die Unterfangungsarbeiten vorsichtig weitergehen. Das anstehende Erdreich wurde jetzt abschnittsweise von Hand abgegraben, das jeweils geöffnete Segment sofort kraftschlüssig ausbetoniert und nach dessen Aushärten das nächste Segment in Angriff genommen. Dies ging so fort, bis das gesamte Treppenhausmauerwerk auf dem neuen Betonfundament saß. Danach konnten die Abdichtungsarbeiten samt Dränage ungehindert fortgesetzt werden (Abb. 7.36).

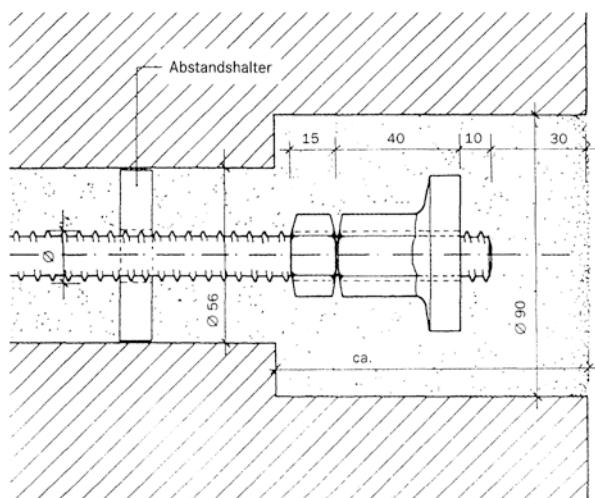
7.2.2 Vernadeln

Bewirken Zug- oder Schubkräfte ein Aufreißen des kraftschlüssigen Mauerwerksverbundes, dann konnten diese Kräfte immer schon mit nachträglich in die Mauer eingesetzten Ankern aufgefangen werden, wie das am Beispiel der Kirche in Ober-dachstetten eingangs gezeigt wurde. Der Einsatz von Stahlankern in das Mauerwerk wurde indessen weiterentwickelt und wird in der heutigen Baupraxis als „*Vernadeln*“ bezeichnet. Es handelt sich dabei um ein nachträgliches Bewehren

Abb. 7.36 Villa in Glaubach. Die fertige Unterfangung des Treppenhauses



Abb. 7.37 Gewi-Endverankerung gekontrakt. Abstandshalter im Bohrloch sichern die allseitige satte Umhüllung des Gewindestahls. (Nach Wenzel 2000)



des Mauerwerks, ein Verfahren, das der Betontechnologie entstammt. Die Nadel besteht aus einem zentrisch in ein vorbereitetes Bohrloch von ca. 36 bis 76 mm Durchmesser eingelegten Ankerstab, der mit einer zementhaltigen Suspension allseitig eingehüllt wird, damit er an keiner Stelle bloß liegt. Das Einhüllen des Ankerstabes geschieht zumeist unter Druck, deshalb wird dieser Vorgang gemeinhin „Verpressen“ genannt. Als Ankerstäbe finden Betonrippenstäbe, Gewindestangen aus genormten Baustählen, zugelassene Gewindestangen oder Spannstäbe Verwendung. Die erhärtete Suspension bildet den sog. „Verpresskörper“, der den Verbund zwischen Ankerstab und umgebenden Mauerwerk sicherstellt. Außerdem dient er der Stahlnadel zugleich als Korrosionsschutz (Abb. 7.37).

Der Einsatz der Vernadelungstechnologie erfolgt in der Regel bei Schäden am Mauerwerk, die auf unverträgliche Verschiebungen oder Verformungen im Mauerwerk zurückzuführen sind. Zwei Instandsetzungsziele können mit dieser Maßnahme erreicht werden: zum einen sein Tragverhalten zu kräftigen, indem man das Mauerwerk dabei lokal vergütet, zum anderen einen weiteren Fortschritt der Riss-

bildung aufzuhalten. Im Regelfalle kommt diese Technik bei folgenden Schadensdiagnosen als Therapie zum Einsatz (Wenzel et al. 2000):

- Risse im Mauerwerk, die es zu sichern gilt;
- Auffangen von horizontalen Kräften, die von Gewölben oder Bögen ausgehen;
- kraftschlüssiges Verbinden von auseinandergetriebenen Mauerwerksschalen, um deren Tragfähigkeit wiederherzustellen;
- Aufnehmen von Zugkräften, die auf das Mauerwerk wirken;
- Überbrückung von Rissen, die durch Arbeitsfugen entstanden sind;
- Sicherung gegen aktive dynamische Einwirkungen;
- Verhindern von weiterem Ausbrechen von Mauerwerksteilen;
- Zusammenbinden von verschiedenen Bauteilen.

Als Anker für die Vernadelung kommen jeweils genormte Stäbe in Frage:

- Betonrippenstähle gemäß DIN EN 10 080: Schweißgeeigneter gerippter Betonstahl B 500,
- Gewindestangen aus Baustählen gemäß DIN 488-1 Betonstahl; Sorten, Eigenschaften, Kennzeichen, bzw. DIN 488-2 Betonstahl: Betonstabstahl, Maße und Gewichte,
- handelübliche Gewi-Stäbe, die eine bauaufsichtliche Zulassung nachweisen können,
- glasfaserverstärkte Kunststoffankerstäbe, GFK-Stäbe, die sich insbesondere im Sandsteinmauerwerk bewährt haben. Ihre Vorteile gegenüber den Baustählen bestehen in ihrer Korrosionssicherheit, ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit, ihrer hohen Zugfestigkeit und ihrem geringen Gewicht. Gleichwohl haben sie auch Nachteile: Sie sind empfindlich gegenüber Querdrücken, weshalb Schraub- oder Muffenverbindungen nicht angewendet werden können, was ihre Flexibilität auf der Baustelle erheblich einengt; sie sind unbeständig in alkalischem Milieu, was ihre Einbettung in eine dauerhaft resistente Kunstharzmatrix erfordert; sie sind schließlich empfindlich gegen Abscheren, weshalb ihre Stabprofilierung besonders widerstandsfähig ausgebildet sein muss.
- nichtrostende Stähle gemäß DIN EN 10 088 Nichtrostende Stähle.

In den meisten Fällen genügen Stabdurchmesser von 10 bis 16 mm. Gleichwohl sind kleinere Stahlnadeldurchmesser günstiger, weil sie den Verbund zwischen gerippter Stahloberfläche und Verpresskörper verbessern. Da es bei unsachgemäßer Ausführung von Vernadelungsmaßnahmen immer wieder zu Korrosionsschäden kommt und der Rost zu Abspregungen von Steinmaterial führt, sollten immer öfter Edelstähle bzw. nichtrostende Stähle zum Einsatz kommen. Diese Spezialstähle erlauben es außerdem, die Mindestüberdeckung mit Verpressgut zu minimieren, d. h. die Bohrlöcher werden kleiner und so geht weniger Originalsubstanz verloren. Gleichwohl können auch nichtrostende Stähle korrodieren, vor allem dann, wenn sie in versalztem, chloridhaltigem Mauerwerk zum Einsatz gelangen. Deshalb müssen unbedingt die Hinweise der Hersteller beachtet werden.

Besonders bei sehr kurzen Verankerungslängen werden die Nadeln an ihrem Ende zumeist verbreitert: es wird ihnen eine sog. „Endverankerung“ aufgeschraubt. Gewi-Endverankerungen bestehen zumeist aus Muttern und Unterlegscheiben aus Stahl, wie sie in der Betonschalungstechnik entwickelt worden sind. Stehen diese

im errechneten Durchmesser nicht zur Verfügung, können auf schweißbare Betonstähle auch Endverankerungsstücke aufgeschweißt werden. Die Endverankerung steigert die Tragfähigkeit der Nadel jedoch nicht signifikant und wird außerdem nur dann sinnvoll, wenn die Druckfestigkeit des Verpresskörpers und des ihn umgebenden Mauerwerks bei der Kraftübertragung nicht überschritten wird. Um solche Endverankerungen richtig einsetzen zu können, muss das Bohrloch z. B. durch Überbohren im Mauerwerk aufgeweitet werden. Der zusätzliche Platzbedarf für die Endverankerung geht selbstverständlich immer zu Lasten der Mauerwerkssubstanz, daher müssen solche Maßnahmen bei unter Denkmalschutz stehenden Mauerwerken mit der Behörde abgesprochen werden (Wenzel et al. 2000).

Der Verpresskörper um die Nadel herum wird in den meisten Fällen aus Zementen nach DIN 1164, Teil 1 mit Wasser (w) – Bindemittel (b) – Werten zwischen $w/b = 0,5$ und 1,0 ohne Zuschlagstoffe hergestellt. Zumeist werden Trasszemente gewählt. Hohe Verbundfestigkeit erreicht man mit einer möglichst fließfähigen, viskosen Zementsuspension mit ausreichend hoher Festigkeit nach dem Aushärten und einem geringen Schwindmaß. Um Schwindrisse im Verpresskörper zu verhindern, ist eine hohe Zementfestigkeit erforderlich. Dies gilt ganz besonders bei nicht oder kaum wassersaugenden Steinen und beim Einsatz einer Zementsuspension mit einem hohen Wasser-Bindemittel-Wert $w/b \geq 1,0$. Das Verpressgut darf nicht übermäßig zum Absetzen seiner Bestandteile neigen, denn sonst besteht die Gefahr, dass sich im oberen Bereich des waagerechten Bohrlochs Hohlräume, sog. „*Lunker*“, bilden.

Verpresssuspensionen sind in ihrer Zusammensetzung jeweils individuell durch das vorhandene Mauerwerksgefüge und durch die Saugfähigkeit seiner Steine bestimmt. Allgemeine Anleitungen zum Anmischen einer geeigneten Suspension vermag niemand zu geben, doch sollte bei nicht wassersaugenden Steinen der w/b – Wert niedrig eingestellt werden, damit eine hohe Verpresskörperfestigkeit erreicht wird. Dies ist aber wiederum vom zulässigen Abpressdruck abhängig, denn wenn der Druck nicht hoch genug ist, wird eine solche weniger fließfähige Suspension möglicherweise Fehlstellen bilden. Wenn das Gegenteil im Mauerwerk der Fall ist, wenn es sich also um stark wassersaugende Steine handelt, kann der w/b – Wert selbstverständlich derart erhöht werden, dass sich die Fließfähigkeit des Verpressgutes entscheidend verbessert. Allerdings droht bei w/b -Werten $\geq 1,0$ das Schrumpfen während der Abbindephase des Verpressgutes, also ein Volumendefizit infolge Hydratation, was wiederum zu schädlichen Hohlräumen führt. In sehr zerklüftetem Mauerwerk kann das Verpressgut darüber hinaus auch unkontrolliert verloren gehen, was sich allerdings mit Hilfe von geeigneten Gewebestrümpfen, mit denen man die Nadeln vorsorglich umgibt, verhindern lässt. Alle diese Überlegungen zeigen deutlich, dass nur kompetente Spezialfirmen mit erfahrenen Fachkräften Verpressungen übernehmen sollten (Wenzel et al. 2000).

Die Suspensionen werden mit Hilfe von Pumpen über Schläuche in die Bohrlöcher unter Druck eingepresst. Die Arbeiten hängen deshalb allemal auch von der handwerklichen Ausführung ab und verlangen die Kompetenz eines fachkundigen Personals auf der Baustelle. Unsachgemäße Handhabung, wie unzureichende Entlüftung der Schläuche oder des Bohrloches, Schwankungen im Arbeitsdruck, Eindringenlassen von Luft oder Veränderung des w/b -Wertes während des Arbeits-

gangs sorgen mit großer Sicherheit für Fehlstellen im Verpresskörper. Auch ein bewusstes Verändern der Fließfähigkeit der Suspension, um zunächst Hohlräume im angrenzenden Mauerwerk zu schließen und dann mit höherem Druck wieder das Bohrloch zu verpressen, führt meistens zu dem gleichen fehlerhaften Ergebnis.

Um eine Stahlnadel richtig zu setzen, sollte folgendes beachtet werden (Wenzel et al. 2000):

- Bohrlöcher für Nadelanker sollten insbesondere bei lockerem Mauerwerksgefüge vorsichtig, also drehend, und nur bei extrem festen Steinen schlagdrehend im Vollbohrverfahren eingebracht werden. Sie sind in der Regel nicht länger als 4,00 m und weisen einen Bohrdurchmesser von etwa 55 mm bei Verwendung von 10 bis 16 mm starken Betonstählen oder um die 35 mm beim Einsatz von korrosionssicheren Stählen auf.
- Kühlwasser verwendende Bohrverfahren sollten nur dort eingesetzt werden, wo das Wasser keinen Schaden anrichtet. Sie haben zweifelsohne den großen Vorteil, dass das Kühlwasser auch das Bohrmehl zuverlässig auswäscht und die Bohrlochwand ausreichend vornässt. Ansonsten sollten Trockenbohrverfahren gewählt werden. Diese entwickeln allerdings sehr viel Staub, der zuverlässig abgesaugt werden muss, was das Bohren erheblich verteuert.
- Mit dem Bohrwasser herauslaufendes Bohrklein erzeugt an den Mauersichtflächen erhebliche Verschmutzungen, sog. „*Trielnasen*“. Um sie zu verhindern, muss der Bohrlochmund zuvor abgedichtet werden.
- Das von den meisten Firmen bevorzugte Reinigen mit Wasser benötigt große Wassermengen, was zu schädlichen Nebenwirkungen führt. Das Wasser schwemmt nicht nur Bindemittel und Zuschlagstoffe aus dem Mauerwerk aus, sondern löst außerdem im das Bohrloch umgebenden Mauerwerk bauschädliche Salze, die wiederum an der Mauerwerksoberfläche auskristallisieren und dort zu Schäden führen.
- Auch das Vornässen des Bohrloches, ein bei durchfeuchtetem Mauerwerk durchaus überflüssiges Verfahren, zumal die Suspension selber wäßrig ist, kann zu den genannten Schäden im Mauerwerk führen.
- Die Bohrlöcher müssen vor dem Einbau der Nadeln gründlich mit Druckluft ausgeblasen werden, um anhaftendes Bohrmehl gänzlich zu entfernen. Allerdings ist Vorsicht beim Druckaufbau geboten, es könnten Steine herausgesprengt oder Putze abgelöst werden. Nur einwandfrei saubere Bohrlöcher gewährleisten eine korrosionssichere Verpressung der Ankerstähle.
- Die Bohrlochwandung muss ausreichend standsicher sein. Manchmal kann dies erst durch eine oder mehrere Zwischenverpressungen erreicht werden.
- Die Nadel muss durch geeignete Packer oder Abstandshalter, die den Durchfluss der Suspension nicht behindern, im Zentrum des Bohrloches gehalten werden, damit die Nadel allseits fehlstellenfrei von Verpressgut umhüllt wird und somit Korrosionsschutz erfährt. Ohne Abstandshalter eingebaute Stähle erreichen keine allseitige Einpackung in ein alkalisches Milieu, sie rosten dementsprechend.
- Die Bohrlöcher dichtet man am besten mit Jutewerg solange ab, bis der Verpresskörper abgebunden hat, also etwa 72 Stunden lang. Zu diesem Zweck können auch handelsübliche Packer eingesetzt werden.

Abb. 7.38 Der vom Gebäude abgerissene Pfeiler wurde mit Gewindestählen (Gewi-Stähle) wieder stand sicher vernadelt



- Der Einbau von Nadelankern lässt im Mauerwerk Bereiche mit gänzlich neuen Verformungseigenschaften entstehen. Zwischen diesen und unverankerten Bereichen können Folgeschäden z. B. neue Risse entstehen. Die Nadeln müssen also immer ausreichend lang sein, um dies zu verhindern.

Bohrlöcher für Stahlnadeln werden zumeist im Vollbohr- und selten im Kernbohrverfahren aufgebohrt. Die Bohrung muss in dem Moment, in dem die Förderung des Bohrkleins plötzlich abreißt, sofort abgebrochen werden, denn das Bohrklein samt Kühlwasser läuft jetzt mit Sicherheit in einen Hohlraum im Mauerwerk. Wenn das Einlaufen nicht unverzüglich unterbunden wird, führt es zu erheblichen irreversiblen Schäden. Die bislang gebohrte Strecke und der angebohrte Hohlraum müssen zunächst mit Verpressgut gefüllt werden. Nach mindestens 72 Stunden Abbindezeit kann das Mauerwerk an dieser Stelle wieder aufgebohrt werden und die Bohrung selbst vollendet werden. Es lohnt sich vor der Zwischenverpressung das Bohrloch mit einem Endoskop zu betrachten, um möglicherweise noch weitere vorhandene Hohlräume im Mauerwerk aufzuspüren, um sie anschließend ebenfalls zu verpressen. Bei inhomogenem, hohlräumreichem, zerklüftetem Mauerwerk können mehrere Zwischenverpressungen benötigt werden (Abb. 7.38).

Bereits bei der Planung und Ausschreibung ist sicherzustellen, dass eine vorgegebene Mindestabpresszeit unbedingt eingehalten wird. Die Mindestabpresszeit ist die Zeit zwischen erfolgter Bohrlochverfüllung und dem Eintreten der lokalen

Abb. 7.39 Die Risse zwischen Pfeiler und Gebäudewand sowie die Löcher im Pfeiler selbst wurden mit Zementsuspension injiziert



Wassersättigung der Bohrlochwand mit einem zeitlichen Sicherheitszuschlag. Die pro Zeiteinheit bis zur Sättigung von der Bohrlochwand aufgenommene Wassermenge ist von der offenen Kapillarporosität des Steinmaterials abhängig. Bei hoher Sauggeschwindigkeit, also bei porösem Material, wird schon nach einer relativ kurzen Abpresszeit die Wassersättigung der Bohrlochwandung erreicht, während bei weniger saugfähigem Material die Gefahr besteht, dass die Wassersättigung während der vorgegebenen Abpresszeit nicht eintritt. Durch den nach Wegnahme des Abpressdruckes fortschreitenden Wasserentzug können wiederum Hohlräume entstehen. Eine beliebig lange Abpresszeit kann zumal bei Verwendung von Zementsuspensionen ebenfalls nicht eingehalten werden, weil die Suspension sonst die Schläuche und Absperrhähne zusetzt. Bei (Wenzel et al. 2000) sind jedoch Anhaltswerte vorgegeben. Ein ausreichender und gleichmäßiger Verpressdruck in Verbindung mit gut fließendem Verpressgut und einer zuverlässigen Bohrlochentlüftung sind die wesentlichen Faktoren bei einer erfolgreichen Stahlnadel-Verpressung im Bohrloch. Wichtig ist, dass man den Druck auch dann nicht mindert, wenn Zementsuspension an unerwünschten Stellen aus dem Mauerwerk austritt, um den Fließvorgang nicht zu unterbrechen. Deshalb müssen alle Löcher und Risse der Mauerwerksoberfläche in der Nähe eines Verpresskörpers vor Beginn der Vernadelarbeiten sorgfältig verschlossen werden. Dies gilt umso mehr, wenn solche Oberflächen unter Denkmalschutz stehen (Abb. 7.39).

Abb. 7.40 Damit die auf die Gewi-Stäbe wirkenden Kräfte nicht zu Abspregungen des Putzes führen, wurden sie mit einem Edelstahlband als Endverankerung untereinander gesichert



Mehrere Male wurde hier bereits vom Korrosionsschutz der Nadelstähle gesprochen. Da immer wieder Feuchte auf den bereits genannten Wegen ins Mauerwerk dringen kann, müssen die Stähle unbedingt von einer ausreichend starken und fehlstellenfreien Zementschicht umhüllt werden. Die Mindestüberdeckung im Bohrloch beträgt 20 mm, an den Ankerenden werden bei (Wenzel et al. 2000) wenigstens 25 bis 30 mm empfohlen. Die Mindestüberdeckung muss auch erforderliche Muffenstöße berücksichtigen. Die größere Überdeckung der Stirnenden ist notwendig, weil abgeschnittene, abgelängte Stähle leicht rosten und daher Rostfahnen aus dem Mauerwerk austreten können, die nur mit einem unvertretbar hohem Aufwand wieder zu beseitigen sind. Auch die dort befindlichen Ankerplatten oder Endverankerungen müssen die Mindestüberdeckung von 25 bis 30 mm aufweisen (Abb. 7.40).

Darüber hinaus ist die Verwendung der richtigen Zemente ausschlaggebend für den Erfolg der Maßnahme. Hat die Voruntersuchung beispielsweise einen hohen Anteil an Sulfaten im Mauerwerk ergeben, so wird man sulfatbeständigen Hochofenzement HOZ wählen müssen. Auf die zur Verfügung stehenden Spezialzemente und ihre Anwendungsfelder wird im Zusammenhang mit dem Injizieren des Mauerwerks noch zurück zu kommen sein (Abb. 7.41).

Die Zugkräfte, die von der Ankernadel aufgenommen werden, sind immer abhängig von dem sie umgebenden Mauerwerk. Versagt das umgebende Mauerwerk, indem es aufreißt, lässt die Ankerkraft schlagartig nach. Die Zugkraft in der Stahl-

Abb. 7.41 Der Riss zwischen Pfeiler und Gebäude wurde mit einer Zementsuspension verpresst

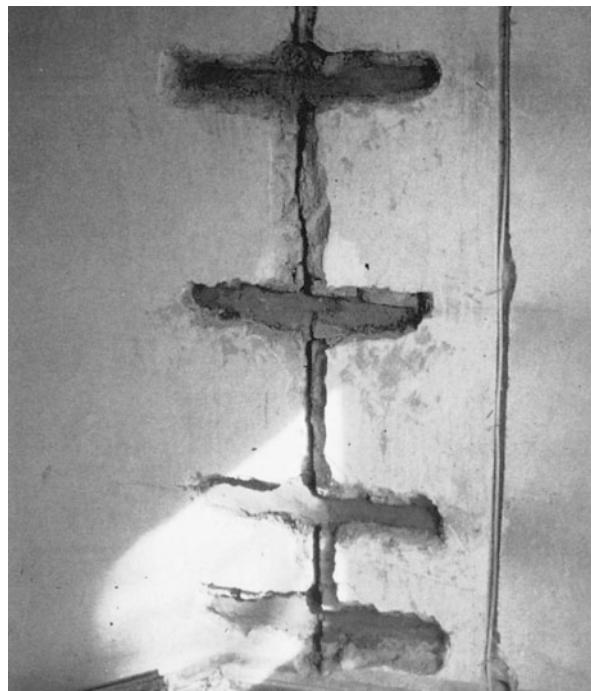


nadel muss also mit dem Mauerwerk abgestimmt und notfalls begrenzt werden, damit keine neuen Risse entstehen. Deshalb ist es häufig notwendig, die Nadel in die Steinmitte statt in die Fugen zu setzen, um den Verpresskörper innerhalb von Steinen entstehen zu lassen. Diese Vorgehensweise kann allerdings zu Konflikten mit der Denkmalpflege führen.

Gerissene Bauteile können nicht nur durch Injektionen mit Zement- oder Kalkleim einfach zusammengeklebt werden, sondern müssen darüber hinaus vor allem bei mehrschaligem Mauerwerk immer vernadelt werden (WTA-MERKBLATT 4-3-98/D). Die Rissufer werden mit den Nadeln zugfest verbunden, indem die Nadeln senkrecht zum Riss angeordnet werden. Bei längeren Wänden kann man die Risse regelrecht „vernähen“, d. h. die Nadeln werden alternierend unter 45° kreuzweise gesetzt. Dabei ist wichtig, dass die Rissbildung abgeschlossen ist, also keine dynamischen Kräfte mehr auf das Mauerwerk wirken. Andernfalls überträgt die Vernadelung die Risse bildende Kraft auf die beiden Nadelenden und statt einem Riss entstehen jetzt zwei.

Kommen wir noch einmal auf die Villa in Glauchau zurück: Wegen der zunächst wesentlich zu schwachen Abstützungskonstruktion riss das Mauerwerk des Treppenhauses von dem der Villa ab. Dabei musste der Verfasser feststellen, dass das jüngere Mauerwerk des Treppenhauses keineswegs ausreichend mit dem älteren der Villa verzahnt gewesen ist. Der senkrechte Abriss zwischen beiden Baukörpern musste deshalb mit Hilfe einer Vernadelung kraftschlüssig verschlossen werden. Also wurde auf der Höhe jeder vierten Lagerfuge des Backsteinmauerwerks ein waagerechter, beiderseits etwa 1,00 m über den Riss hinausreichender Baustahl Ø 10 mm eingelegt. Der Baustahl wurde an seinen Enden umgebogen, um einen sicheren Halt im Mauerwerk zu gewährleisten. Um ihn kraftschlüssig, korrosionsicher und ohne Erschütterungsschäden einbauen zu können, stellte die Baufirma mit einer Trennscheibe einen etwa 10 cm tiefen Schlitz im Mauerwerk her, in den

Abb. 7.42 Der Riss in der Treppenwand wurde vernadeln. Die Nadeln wurden freilich sehr kurz gewählt, aber an ihren Enden umgebogen. Der Riss ist bis heute nicht mehr aufgetreten



zunächst Zementmörtel MG III eingeworfen wurde. In diesen Mörtel wurde der Betonstahl sauber eingebettet und anschließend schlossen die Maurer den Schlitz sowie der aufgehende Setzungsriß mit Zementmörtel MG III. Anschließend putzten sie die Vernadelungsbereiche mit einem hydraulischen Kalkputz, in den zur Sicherheit eine dünnes Kunststoffgewebe eingelegt wurde, ein. Mit dem weniger harten zweiten Putz sollte ein Spannungsabbau hin zum vorhandenen, originalen Kalkwandputz der übrigen Wandbereiche erzielt werden. Die Maßnahme hat sich bis heute bewährt: in den seit damals vergangenen 17 Jahren sind die Risse im Treppenhaus nicht wieder aufgetreten (Abb. 7.42).

Das Beispiel zeigt, wie eng die einzelnen Instandsetzungstechniken zur nachträglichen Verbesserung der Standsicherheit ineinander greifen.

Beim Vernadeln mehrschaligen Mauerwerks wird bei schlechtem Gefügezustand ein Nadelraster notwendig, das ein Knicken oder Ausbauchen der Einzelschalen verhindern soll. Die Nadeln sollen den Zusammenhalt von Außenschalen und Innenfüllung gewährleisten. Bei Mauerquerschnitten $\geq 1,00$ m wählt man einen Nadelabstand von 1,00 m, bei geringeren Wanddicken einen in der Dicke des Mauerwerks. Häufig werden entgegen dieser Faustregel größere Nadelabstände gewählt, um die Maßnahme nicht so teuer werden zu lassen. Die Entscheidung zu größeren Nadelabständen kann nur ein erfahrener Fachmann am individuell vorhandenen Mauerwerk treffen. Dabei gilt: „Je m^2 Wandfläche sind 5 % der zulässigen vertikalen Gebrauchslast als horizontale Nadelzugkraft anzusetzen“ (Wenzel et al. 2000). Um die Effizienz zu steigern, können die Nadeln auch versetzt angeordnet werden

(Nadoushani 1992). Die Nadeln sollten sowohl von innen als auch von außen gesetzt werden und durch Endverankerungsstücke gut verbunden werden, um ein Aufspalten des Mauerwerks zu verhindern.

7.2.3 Vernadeln mit vorgespannten Stählen

Die Anwendung dieser Technik, die zur Laststeigerung von Betonbauwerken entwickelt worden ist, erfordert noch genauere Kenntnis des Mauerwerks und der Schadensursachen. Sie wird nur bei schwerer Beschädigung des Mauerwerks, also vor allem dann eingesetzt, wenn stark zerrissene Wände und Pfeiler wieder kraftschlüssig zusammengefügt werden sollen. Mit ihrer Hilfe lässt sich der Kräftefluss in der alten Mauerwerkskonstruktion geeignet korrigieren oder umlenken. Die Wand kann dann sogar nicht neutralisierte Horizontalschübe schadlos übernehmen (Wenzel et al. 2000).

Das Vorspannen bewirkt stets eine Lastumlagerung und stellt selbstverständlich einen tiefen Eingriff in das Tragsystem dar. Es verlangt sowohl eine sorgfältige Planung als auch eine handwerklich saubere Ausführung. Auch die nachträgliche Qualitätskontrolle ist unverzichtbar. Die Spannglieder können sowohl außerhalb als auch innerhalb des Mauerwerks geführt werden. Wenn aber ästhetische Überlegungen, thermische Faktoren und der Brandschutz eine große Rolle für das Festlegen der Spannstäbe spielen, wird man dem Verlegen innerhalb des Wandquerschnitts den Vorzug geben. Auf jeden Fall laufen die Spannglieder immer geradeaus, ihre Lage muss also genau geplant werden. Manchmal kommt man nicht umhin, die Lage noch während der Baumaßnahme zu korrigieren. Die Spanngliedführung richtet sich stets nach dem Rissverlauf. Deshalb ist ein sehr genaues, verformungsge rechtes Aufmaß der Wand unerlässlich, um die Lage jedes Spannglieds exakt festlegen zu können. Schon geringe Abweichungen davon können erhebliche Risse in anderen Mauerwerksbereichen verursachen. Deshalb muss das Bohrloch mit einem Durchmesser zwischen 75 und 90 mm mit einer hohen Zielgenauigkeit hergestellt werden. Vor dem Ankereinbau ist der Verlauf des Bohrloches zu überprüfen. Wenn die Achse aus dem Kerndrittel des Mauerwerks driftet, darf der Spannstahl nicht eingebaut werden.

Spannanker bestehen aus Spannstahl mit durchlaufend aufgewalzten Gewindestrippen, z. B. System Dydiwag, aus hochfesten, korrosionssicheren, glatten oder gerippten Stählen, z. B. Staifix, oder aus glasfaserverstärkten Werkstoffen. Vor dem Vorspannen richtet man am Ende des jeweiligen Spannstabes Ankerkörper vor, deren Größe von der gewählten Vorspannkraft und der zulässigen Teilflächenpressung des Mauerwerks abhängt. Die angeordneten Ankerplatten aus Stahl oder Ankerkörper aus Stahlbeton treten zumeist an die Stelle eines oder mehrerer Mauersteine – ein Verlust an Originalsubstanz, den die Denkmalpflege nur schwerlich hinnehmen wird. Bestehen die Ankerkörper aus Stahlbeton, müssen sie rechtzeitig vor Ankereinbau betoniert worden sein, um die erforderliche Festigkeit zur Aufnahme der Spannkräfte zu besitzen. Zwischen dem Einbau des Ankers in das Bohrloch, dem Aufbringen der Vorspannkraft mit einer hydraulischen Presse und dem Verpressen

des Bohrlochs mit Zementsuspension darf nur wenig Zeit verstreichen, damit der Stahl nicht anfangen kann zu rosten. In den Monaten November bis März kann deshalb, weil bei einer Außentemperatur von weniger als +5 °C auf keinen Fall injiziert werden darf, der Ankereinbau kritisch werden.

Bei an ihren Enden verankerten Spannstäben ist der kraftschlüssige Verbund des Ankers und seines Verpresskörpers mit dem Mauerwerk unwesentlich, er muss nur – wie bereits beim Vernadeln dargestellt – korrosionssicher verbaut sein. Besteht die Gefahr, dass das Mauerwerk etwa infolge kapillar aufsteigenden Wassers durchfeuchtet wird, empfiehlt es sich, den Spannstab in einem separaten Hüllrohr zu verlegen (WTA-MERKBLATT 4-3-98/D). Wenn dabei kein korrosionsfreier Stahl verwendet wird, müssen gesonderte Korrosionsschutzmaßnahmen wie Einfetten oder Abdecken mit Schutzmassen innerhalb des Hüllrohrs bedacht werden. Der Vorteil des Vorspannens ohne Verbund mit dem Mauerwerk liegt auf der Hand: Sowohl die Ankerkraft als auch der Spannstab selbst können überprüft werden, ein späteres Nachspannen oder gar Auswechseln des Stabes ist jederzeit möglich. Der Nachteil freilich ist eben gerade diese erforderliche periodische Überwachung der Konstruktion.

7.2.4 Injizieren, Verpressen

Das Einpressen von Suspensionen aus Zement- oder Kalkkleim wird vorgenommen, um Hohlräume, Klüfte, Spalten, Risse, offene Fugen oder auch Bohrlöcher im Mauerwerk formschlüssig oder kraftschlüssig zu verfüllen. Der Zweck solcher Maßnahmen soll entweder vorhandene Schäden beheben, die Tragfähigkeit des Mauerwerks und seines konstruktiven Gefüges verbessern oder die Gebrauchstüchtigkeit erhöhen. Beim Einbau von Stahlnadeln oder Spannankern muss das Verpressgut zusätzlich noch den innigen Verbund mit dem umgebenden Mauerwerk gewährleisten und darüber hinaus den eingebauten Stahl vor Korrosion schützen. Großflächige Verpressungen sollten vermieden werden, die Injektionsmaßnahme nur lokal begrenzt angelegt sein.

Ziele des Verpressens

- großräumige Auffüllung von Hohlräumen, Klüften, Rissen und offenen Fugen zur Verbesserung von Struktur und Zustand ganzer Bauteile aus Mauerwerk,
- lokal begrenzte Gefügeverbesserung an geschädigten Stellen oder in Bereichen erhöhter Belastung wie Auflager von Gewölben, Stürzen und Verankerungen,
- Füllung von Bohrkanälen, um einen korrosionssicheren Verpresskörper zu bilden, wie oben beschrieben.

Das Injizieren von hydrophob eingestelltem Verpressgut in das Mauerwerk dient nicht allein der Trockenlegung; das neu eingebrachte Material kann sogar die Kapillarität des Mauerwerks steigern. Es verändert außerdem das konstruktive und materielle Mauergefüge, es stellt also einen gravierenden und nicht mehr umkehrbaren Eingriff in die Bausubstanz dar. Die Injektionsmaterialien müssen hinsichtlich mineralogischer Verträglichkeit mit den bestehenden Baustoffen sorgfältig ausgewählt werden. Insbesondere das gefährliche Gipstreiben, die Ettringitbildung, muss beachtet werden. Sie entsteht beim Zusammentreffen von Aluminat, einem Bestandteil der Zemente, und Gips in kalkgesättigter Lösung. Das Treibmineral Thaumasit kann ebenfalls in gipshaltigem Kalkmörteln gebildet werden. In beiden Fällen ergibt sich die Treibkraft aus der beträchtlichen Volumenvergrößerung durch Bindung von Hydratwasser. Außerdem sollte das Injektionsgut keine Quelle bau schädlicher Salze bilden.

Die Voruntersuchungen sollten den Hohlraumanteil des geschädigten Mauerwerks zuverlässig bekannt gemacht haben. In einschaligem Bruchsteinmauerwerk sind erfahrungsgemäß bis zu 5 % Hohlraumanteil möglich, bereichsweise auch mehr. Die Innenfüllung zweischaligen Mauerwerks besitzt im Mittel 10 % Hohlräume, kann aber in gravierenden Fällen bis zu 25 % Hohlräume erreichen. Die tatsächlichen Hohlraumanteile sind nur mit viel Erfahrung zu schätzen (s. Abb. 6.30).

Fehlstellen ausreichender Größe werden mit mineralisch gebundenen Suspensionen, die nur aus Bindemitteln und Wasser bestehen, oder mit Mörteln verfüllt.

Bindemittel mineralisch gebundener Suspensionen

- hochhydraulische Kalke
- Trasskalke
- Zemente wie Portlandzement PZ
- Eisenportlandzement EPZ
- Hochofenzement HOZ
- Trasszement TrZ
- Portlandölschieferzement PÖZ
- Zemente mit hohem Sulfatwiderstand
- HS-Zemente
- Sonderzemente wie solche mit niedrigem Alkali-Anteil
- NA-Zemente
- Mikro- oder Feinstzemente

Grundsätzlich sollten die Bindemittel zwei Ansprüchen genügen: zum ersten einen minimalen Gehalt an Trikalziumaluminat C_3A aufweisen und zum anderen die bei der Hydratation hydraulischer Bindemittel entstehenden freien Kalke durch reaktionsfähige Puzzolane binden.

Um große Hohlräume zu füllen, kann man die Suspension mit Gesteinsmehl, Trass, Bims, Ziegelsplitt und Feinsand der Körnung 0–1 mm abmagern, es entsteht immer noch viskoser Mörtel. Um diesen zu verbessern, benutzt man häufig Zusatz-

oder Dichtungsmittel zur Verminderung der kapillaren Saugwirkung des erhärteten Injektionsgutes, Einpresshilfen zur Verbesserung der Fließfähigkeit sowie Vermeidung von Entmischen (Sedimentation) der Suspension, Erstarrungsverzögerer und schließlich Mittel zur Erzeugung von Quelleigenschaften, um den Hohlraum besser auszufüllen. Eine Einpresshilfe besonderer Art ist Betonit. Es verbessert die Fließfähigkeit, erhöht das Wasserrückhaltevermögen und verzögert die Sedimentation (Wenzel et al. 2000).

Schwerwiegende Schäden können bei einer einwandfreien Beherrschung der Injektionstechnik am Mauerwerk eigentlich nicht entstehen. Gleichwohl ergeben sich solche Schäden immer dann, wenn

- im Mauerwerk große Anreicherungen des Verpressgutes entstehen und dessen Festigkeit wesentlich vom bestehenden Mauerwerk abweicht,
- Verpressgut und vorhandener Mörtel bei Durchfeuchtung unterschiedliches Schwind- bzw. Quellverhalten aufweisen und dies durch Feuchtestaus noch verstärkt wird,
- Bestand und Verpressgut verschiedene Wärmedehnungen besitzen und größere Hohlräume im oberflächennahen Bereich verfüllt worden sind,
- im Mauerwerk wasserlösliche Sulfatsalze, vorwiegend Gips, enthalten sind, die an den Kontaktflächen zum Verpressgut oder in diesem selbst Treibmineralien bilden,
- eine ständige oder häufige Durchfeuchtung injizierter Mauerwerksbereiche erfolgt, wobei die oben genannten Schadensmechanismen ausgelöst werden,
- Anreicherungen hygroskopischer Salze im Mauerwerk eine hohe Ausgleichsfeuchte bewirken (WTA-MERKBLATT 4-3-98/D).

Sollen feine Risse verpresst werden, die für mineralische Injektionsgüter nicht zugänglich sind, und soll ein hoher Haftverbund erzielt werden, erfolgt die Injektion mit lösungsmittelfreien Kunsthären. Dabei muss sichergestellt sein, dass das hochviskose Verpressgut nicht in größere Fehlstellen abfließen kann. Die Verpressung ist dann einer Verklebung gleichzusetzen. Kunsthäre sind als chemisch inert anzusehen und reagieren nicht mit im Mauerwerk enthaltenen Salzen. Dementsprechend entstehen keine Treibreaktionen. Allerdings gelten die ersten drei der oben für mineralisch gebundene Einpressgüter angeführten Schadensursachen auch für kunstharzgebundene Systeme.

7.3 Neues Verfugen und Rissbehandlung

Wenn die Standsicherheit und Gebrauchstüchtigkeit des Mauerwerks durch Verna deln und Verpressen gesichert ist, muss die Maueroberfläche behandelt werden. Vorhandene Risse, die nicht schon vor den genannten Maßnahmen geschlossen wurden, sind spätestens jetzt bis in erreichbare Tiefen mit Pressluft sauber auszublasen und bei Rissbreiten ≥ 6 mm mit Hilfe von Verpresslanzen aus der Tiefe heraus bis zur Mauervorderkante mit Mörtel zu füllen. Hohlliegende oder gerissene Putzflächen auf dem Mauerwerk werden in der Regel abgeklopft und als Bauschutt entsorgt.

Tragen sie jedoch Farbfassungen oder Stuckdekor, sind sie zumeist als schützenswert eingestuft und bedürfen einer besonderen Behandlung durch einen Restaurator. Dieser wird zu ihrem Schutz mit Schaumstoff gepolsterte Stützschalungen errichten. Aber auch gelöste Außenschalen zweischaliger Mauerwerke müssen während des Verpressens ihrer Füllungsräume durch Stützschalungen gesichert werden, denn sie würden durch den eingebrachten Druck sich gänzlich ablösen und umfallen.

Grundsätzlich sollte der alte Fugenmörtel überprüft werden. Schlechte Fugenmörtel, also solche ohne oder mit nur noch geringen Bindemittelanteilen, sind so tief wie möglich, jedoch mindestens 5–10 cm tief, auszukratzen und durch Mörtel besserer Qualität zu ersetzen. Der Ersatzmörtel muss manchmal, z. B. im Bereich von Spannankerkörpern, eine derart hohe Festigkeit erzielen, dass man um Kunststoffvergütete Mörtel nicht umhinkommt. Zum Freiräumen der Fugen lassen sich neben Kratzeisen, Stahlbürsten oder leichten Stemmhämmern auch mit feinen Düsen bestückte Strahlgeräte mit Erfolg einsetzen. Lose Steine müssen mit Holzkeilen gegen Herausfallen gesichert werden. Trockener Fugenmörtel lässt sich als Bau-schutt entsorgen (s. Abb. 7.18).

Beim anschließenden Wiederverfugen hat sich das Trockenspritzverfahren sehr bewährt. Dabei wurde als Bindemittel für den Fugenmörtel außer Zement auch hydraulischer Kalk und geeigneter Trasskalk eingesetzt. Das Verfugen im Trockenspritzverfahren wird mit Pumpen und Spritzdüsen durchgeführt. Letztere hält der ausführende Arbeiter, um das Verschmutzen des Mauerwerks in Grenzen zu halten, direkt an die Fugen. Auf diese Weise wird zwar das Aufprallen und das Verspritzen des Mörtels nach allen Seiten vermieden, aber das erforderliche Durchmischen mit dem beigegebenen Wasser gelingt nicht sehr gut. Wegen des nicht tief genug eingedrungenen Wassers findet man bei der Qualitätskontrolle hinter dem ordentlich abgebundenem Fugenmörtel der Oberfläche oft noch völlig unabgebundenen Mörtel. Um dies zu vermeiden, sollte man das modernere Einbringverfahren von Fugenmörtel mit Hilfe von Lanzen anwenden, das sich auch beim Füllen von Rissen bewährt hat. Der Mörtel als maschinengängiges Gemisch wird dabei über eine Schneckenpumpe mit dosierbarer Fördermenge mit einer Lanze direkt in die Fuge eingebracht. Das Einbringen des Fugenmörtels mit Lanzen stellt ein leistungsfähiges System dar, das zudem den großen Vorteil aufweist, dass bei sorgfältiger handwerklicher Arbeit so gut wie keine Verschmutzung der Mauerwerksoberfläche eintritt (Abb. 7.43).

Senkrecht zur Lagerfuge gespaltene Werksteine im Mauerwerk zeigen an, dass die Steine nur punktuell satt mit Fugenmörtel unterfüttert sind. Oft haben die Mauer Glimmer, Bleiplättchen, Gesteinsbrocken oder Hartholzstücke unter den Quader geklemmt, um ihn im Mauerwerk auszurichten. Die umgebende Lagerfuge wurde dann nur oberflächig geschlossen. Dieser Zustand muss dauerhaft beseitigt werden, indem man die Lagerfuge auch hinter der unter den Quader geklemmten Unterlage vollflächig mit Mörtel verpresst. Zuvor muss freilich die Lagerfuge außen provisorisch mit von Hand angeworfenem Mörtel abgedichtet werden. Da bei der Verpressung die eingeschlossene Luft entweichen können muss, dürfen die erforderlichen Luflöcher im provisorischen Mörtel nicht vergessen werden. In der Praxis sieht man häufig zur Ersparung dieses oftmals aufwendigen Arbeitsganges in die Fugen eingedrücktes Papier leerer Zementsäcke, was als ungeeignet abgelehnt werden

Abb. 7.43 Die Fugen des Sandsteinmauerwerks wurden mit Trassmörtel ausgefügt



muss. Ausstopfen mit Werg oder Reißwolle hat sich dagegen als durchaus geeignet erwiesen. Nach dem Erhärten des Verpresskörper wird die provisorische Verfugung entfernt und eine ordentliche Verfugung von Hand ausgeführt.

Wenn Ausbesserungen des Mörtels an Sichtmauerwerk erforderlich werden, die nur partiell in die Substanz eingreifen, kann der Oberflächenverschluss der Fugen auch von Hand wirtschaftlich sinnvoll sein. Liegt aber im gesamten Mauerwerk schlechtes Fugenmaterial vor, sollte eine komplette Außenhautinstandsetzung vorgenommen werden. Dazu wird zunächst – wie oben beschrieben – der schlechte Fugenmörtel entfernt. Lose Steine werden durch Festkeilen gesichert. Tiefgehende Spalten, Fugen oder Risse werden zuerst mit Injektionsstutzen besetzt, über die dann später die Verpressung erfolgt. Die vorbereiteten Fugen werden entweder im Lanzenverfahren oder im Trockenspritzverfahren mit Mörtel gefüllt. Da dennoch eine Verschmutzung des Sichtmauerwerks oftmals nicht zu vermeiden ist, sind unmittelbar nach Abschluss der Spritzarbeiten die Steinflächen von anhaftenden Mörtel schonend zu befreien. Weil dabei zumeist Strahlgeräte erforderlich sind, wird mit den harten Strahlmitteln das Porengefüge der Außenhaut aufgerissen und die Patina der Steine zerstört. Weniger zerstörerisch wirkt dagegen das „JOS“-Verfahren. In der Denkmalpflege legt man manchmal sogar Wert darauf, den alten Bewuchs mit Algen und Moosen zu erhalten. Dann müssen schonende, freilich kostenaufwendigere Verfahren eingesetzt werden: Man kann die Steine vor dem Fugenverschluss mit einer Tonschlämme beschichten, die nach Abschluss der Verfugung vorsichtig abgewaschen wird. Großflächige Steinquader wird man durch Aufkleben einer Folie schützen, die nach Abschluss der Fugenverfüllung leicht abgezogen werden kann. Allerdings dürfen Folien nie lange aufgeklebt bleiben, denn unter ihnen wird sich bald Schwitzwasser bilden, das den Stein allmählich durchfeuchtet. Dies führt zu den bereits mehrfach beschriebenen Wasser- und Salzsäden (Abb. 7.44).

Textur, Oberfläche und Farbtönung der Fugen sind entscheidende Faktoren für das Erscheinungsbild eines Sichtmauerwerks. Je nach benutztem Sand kann die Farbtönung von Hellgrau bis hin zu einem satten Braun changieren. Wenn die Originalfarbe fachgerecht dokumentiert wurde, ist es ein Leichtes, sie wiederherzu-

Abb. 7.44 Melsungen, Bartenwetzerbrücke. Die Fugen im Mauerwerk wurden sauber ausgekratzt

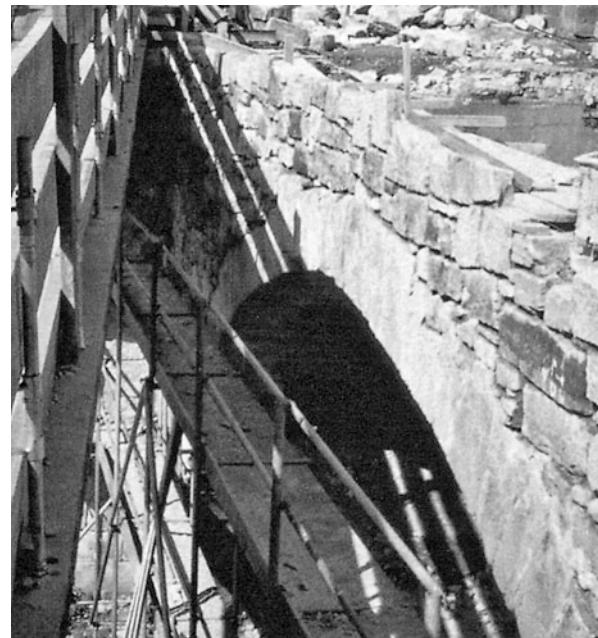
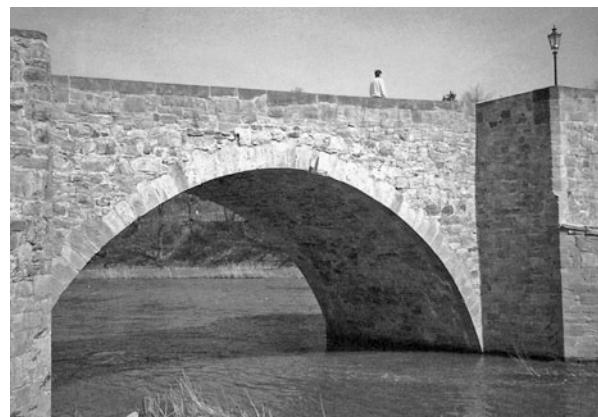


Abb. 7.45 Melsungen, Bartenwetzerbrücke. Ansicht des fertig verfugten Brückenmauerwerks



stellen. Oft sind historische Fugen auch mit Fugenritzern versehen; sie können vollflächig oder vertieft verfugt sein. Manchmal wird der Fugenmörtel auch mit der Kelle einmal von oben und dann von unten abgestreift, so dass in der Mitte ein Grat stehenbleibt. Die Art der Fugenausbildung kann durchaus ein Datierungsmerkmal für das Mauerwerk oder sogar ein Erkennungsmerkmal für einen bestimmten Baumeister darstellen. Über den Stein überstehender Fugenmörtel jedenfalls ist grundsätzlich fehlerhaft und führt zu Schäden im Mauerwerk. Mit Hilfe einer sorgfältigen Bindemittelauswahl lässt sich der historische Mörtel durchaus nachstellen. Meistens wird mit Fugenmörtel auf der Basis von Trasskalk verfugt (Abb. 7.45).

Alle neu verfügten Mauerwerksoberflächen sind selbstverständlich fachgerecht nachzubehandeln, um ein zu schnelles Austrocknen zu verhindern. Der Mörtel darf keinesfalls „verbrennen“. Deshalb muss die Wand mit feuchten Tüchern abgehängt werden oder es muss ein Arbeiter beauftragt werden, die Wand wiederholt vorsichtig anzufeuchten. Während des Verfugens darf die Oberfläche des Mauerwerks keinesfalls direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt sein. Deshalb sind die Arbeitsgerüste ordentlich mit Schutzplanen zu behängen.

Eine behutsame, die Oberfläche nicht oder zumindest nur geringfügig zerstörende Reinigung von Fassaden und von altem genauso wie von neu verfugtem Mauerwerksoberflächen stellt ein nicht immer leicht zu erfüllendes Postulat dar. Je hartnäckiger der Verschmutzungsgrad, je fester z. B. Altanstrichreste oder mutwillig aufgetragene Graffiti auf der Fassade haften, desto schärfer wird der Reinigungsprozess in die Substanz der Fassadenoberfläche eingreifen müssen und desto aggressiver werden die angewendeten Reinigungsmethoden sein. Es lässt sich oftmals nicht verhindern, dass dabei sehr giftige Reinigungsmittel zum Einsatz kommen, deren Unverträglichkeit mit unserer Umwelt und deren Gefährlichkeit für mit ihnen arbeitende Handwerker große Sorgfalt und Verantwortungsbewusstsein im Umgang mit ihnen voraussetzt. In der Denkmalpflege jedoch gehen die Forderungen in die umgekehrte Richtung: Mauerwerksoberflächen sollen möglichst samt Patina erhalten bleiben.

Beim Entfernen von Fassadenbeschichtungen wie Altanstriche, farbige Besprühungen (Graffiti), Öle, Teere, Bitumen, Gummierungen, aber auch Ausblühungen werden auch umweltunverträgliche Bestandteile der Fassadensubstanz freigesetzt. Das brisante Gemisch bildet problematische Schlämme, für deren fachgerechte Entsorgung mit Bedacht und Umsicht zu Werke gegangen werden muss. Im Zuge der rasant wachsenden Bedeutung des Umweltschutzes muss auch der Handwerker insbesondere beim Reinigen von mineralischen Oberflächen immer mehr Sorgfalt walten lassen. Es gilt schädliche Immissionen zu vermeiden und Chemikalien, wie sie etwa Farbschlämme aufweisen, umweltverträglich zu entsorgen. Auch Staubemissionen, die bei abrasiven Reingungstechniken entstehen, müssen sorgfältig aufgefangen und ohne Beeinträchtigung der Umwelt entsorgt werden. Selbstverständlich dürfen nur solche Reinigungsmethoden angewendet werden, welche die Oberflächen behutsam und mit geringst möglichem Grad an Zerstörung alter Bausubstanz befreien. Dieses zunächst wie ein Allgemeinplatz klingende Postulat erweist aber an jedem zu reinigendem Mauerwerk immer wieder aufs Neue sehr schnell, dass die Reinigungsaufgabe jedesmal hohe Anforderungen an die ausführende Firma stellt (Abb. 8.1).

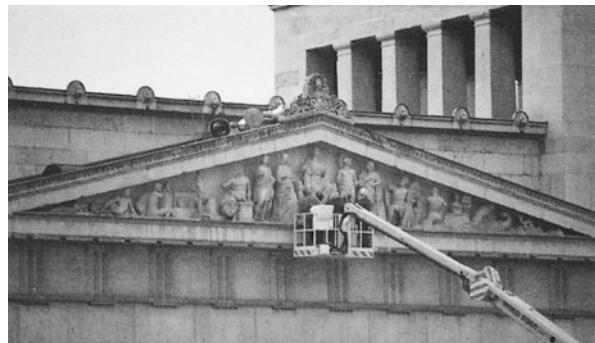
Abb. 8.1 Reinigungspasten werden bei festhaftendem Altanstrich häufig eingesetzt. (Blau eingefärbte Wandfläche)



8.1 Untersuchung der Oberfläche vor dem Reinigen

Ein Großteil der Fehler beim Reinigen der Mauerwerksoberflächen und dem Beiseitigen der dabei anfallenden Schlämmen sowie Farbresten lässt sich durch eine sorgfältige Voruntersuchung der zu säubernden Flächen vermeiden. Die Praxis lehrt, dass es keineswegs genügt, in Ermangelung eines Gerüstes oder eines Hubwagens die zumeist sehr hohen Fassaden nur mit einem Feldstecher abzusuchen, ob eventuell kritische Zonen vorhanden sind. Ein Fachmann wird zunächst ein Probegeurst aufstellen oder die Fassade mit einem Hubwagen befahren, um Schäden wie lose Putzpartien, zerstörten Fugenmörtel, verwitterte und dabei salzbelastete Flächen des Mauerwerks, also Zonen hygrischer Feuchte, festsitzende, nur durch Ablaugen zu entfernde Farbpartien, Moosbewuchs und vieles mehr erkennen zu können. Dabei muss der Handwerksmeister oder der ausschreibende Fachingenieur die Wandoberfläche stets mit allen seinen Sinnen erfassen: es gilt also mit den Augen eine optische, mit den Fingern eine haptische und mit den Ohren eine auditive Prüfung der Oberfläche vorzunehmen. Bereits die bloße Berührung mit den Fingern sagt über ihre Beschaffenheit etwas wichtiges aus: nämlich über den Grad an Rauheit, über die Feuchtigkeit und über die allgemeine Beschaffenheit z. B. von absandenden, mehligen Stellen. Die Klangprobe beim Abklopfen mit dem Hammer lässt Hohllagen erkennen. Sogar der Geschmackssinn kann helfen, Ausblühungen

Abb. 8.2 München, Königsplatz. Um die Schadensbilder am Giebeldreieck der Propyläen genau feststellen zu können, wurde ein Hubwagen eingesetzt



als Folge von Versalzungen zu identifizieren. Auch harnäckige Schmutzkrusten können so von allgemeiner Verschmutzung unterschieden werden. Solche besonders aufwendig zu reinigende Partien sollten dokumentiert, d. h. sie sollten fotografiert und in eine Fassadenzeichnung möglichst genau eingetragen werden. Das hilft hinterher, vor allem bei der Abrechnung der Reinigungsarbeiten, den erforderlichen Aufwand zu belegen (Abb. 8.2).

Um weitergehende Erkenntnisse zu gewinnen, sollten alle mineralischen Fassadenoberflächen gemäß der VDI-Richtlinie 3798 „*Untersuchung und Behandlung von immissionsgeschädigten Werkstoffen*“ und den entsprechenden WTA-Merkblätter 3-5-98/D „*Natursteinrestaurierung nach WTA – Reinigung I*“ und 3-9-95/D „*Natursteinrestaurierung nach WTA – Bewertung von gereinigten Werksteinoberflächen*“ untersucht werden. Schließlich entsteht ein Kenndatenprofil der gesamten belasteten Oberflächenbereiche der Fassade. Erst mit Hilfe eines solchen sorgfältig erstellten Kenndatenprofils kann ein gewissenhafter Fachmann einen geeigneten Maßnahmenplan für eine behutsame, wenig zerstörerische und kostengünstige Reinigung aufstellen.

8.2 Unerwünschte, zu entfernende Beschichtungen

Jede Mauerwerksoberfläche wird im Laufe der Jahre verschmutzen, da sich Staub- und Rußpartikel, durch Wind und Regen herangetragen, auf ihre Oberfläche legen. Sie bilden mit der Zeit eine schwärzliche Kruste, die oft innig mit der Fassadenoberfläche verbunden ist. Diese Kruste ist schädlich für das Mauerwerk, weil sie die Oberflächenporen verstopft und damit die Wasserdampfdiffusionsfähigkeit sowie den kapillaren Wassertransport beträchtlich mindert (s. Kap. 5). Es kommt hinter den dichten Krusten zu einem Wasserstau, was zu Frostaufrüchen führen wird. Darüber hinaus können solche Partikel je nach Oberflächenmaterial chemische Reaktionen auslösen, die zur Zerstörung des Natursteinmauerwerks beitragen.

Beim Reinigungsprozess sollen jedoch nicht allein die Verschmutzungen beseitigt werden, sondern in aller Regel auch die vorhandenen Altanstriche. Solche zu-

Abb. 8.3 Altanstriche haben sich in geschützten Bereichen, z. B. über der Haustür, erhalten



meist in mehreren Schichten übereinanderliegende Anstriche verstopfen punktuell die Oberflächenporen der Fassade, behindern also die Wasserdampfdiffusion, und besitzen in der Regel kaum mehr die notwendige Haftfestigkeit. Deshalb taugen sie als Anstrichuntergrund nicht mehr. Sie sind sorgfältig und lückenlos zu entfernen (Abb. 8.3).

Des weiteren besteht heutzutage in zunehmendem Maße das Problem der Be seitigung aufgesprühter Graffiti. Sie sind oft so innig mit der Fassadenoberfläche verbunden, dass nur Abbeizen oder Abstrahlen sie zu entfernen hilft (Abb. 8.4).

Beschichtungen mit Latex, Gummierungen, Bitumen, Epoxidharzen und Chlor kautschuk stellen insbesondere bei minderfesten Untergründen ein kompliziertes Reinigungsproblem dar. Sie haften besonders hartnäckig und erzwingen beim Ab strahlen Zusätze zum Strahlgut, die zumeist oberflächenzerstörend wirken und außerdem häufig eine Belastung für die Umwelt sowie eine Gefährdung des aus fürenden Handwerkers sein können.

Aber nicht nur von außen auf das Mauerwerk aufgetragene Schichten müssen entfernt werden. Meistens geht die Verschmutzung einher mit Ausblühungen von bauschädlichen Salzen.

Rekapitulieren wir kurz: Bei mineralischen Baustoffen lösen sich Salze in der vorhandenen oder eingedrungenen Bauteilfeuchte und diffundieren an die Mauer werksoberfläche. Dort kristallisieren sie zu mehr oder minder bauschädlichen Sal

Abb. 8.4 Graffiti auf einer Hauswand sind oft hässliche Verunstaltungen



zen, die sich in die Oberflächenporen einlagern und dabei die Porenwände aufspren- gen (s. Kap. 5.2). Als Kristalle wirken sie jetzt zusätzlich noch als die Verursacher von hygrokopischer Feuchte, in der sie sich alsbald erneut lösen. Beim anschließen- den Austrocknen wiederholt sich der Kristallisationsvorgang. Auf diese Weise wird im steten Wechsel von feuchter und trockener Oberfläche der Mauerstein schließlich gänzlich zermürbt. Solche Ausblühungen zeigen sich zuerst als weiße oder graue Schleier auf der Wand, mit der Zeit jedoch als mehr oder minder starke Verwitterung. Die mit bauschädlichen Salzen zugesetzten oberflächennahen Schichten des Mauer- werks sind in aller Regel ebenfalls zu entfernen, was aber stets mit Verlusten an Ori- ginalsubstanz verbunden ist. Sogenannte „*Salzumwandler*“, die aus bauschädlichen Salzen unschädliche machen sollen, kommen hier auch zum Einsatz (s. Kap. 7.1.4). Diese Behandlung ist stets mit einer nachhaltigen Wässerung der Fassade verbunden. Dabei wird ein großer Teil der eingesetzten, oft sehr giftigen Chemikalien wieder ab- gewaschen und muss demgemäß mit dem Abwasser fachgerecht entsorgt werden.

Ein wichtiges Ziel der Reinigung ist es, dass mineralische Baustoffe durch das Reinigen ihre Offenporigkeit wieder erhalten und sich infolgedessen ihre Wasserdampfdiffusionsfähigkeit entsprechend erhöht. Dabei muss insbesondere darauf geachtet werden, dass bei minder harten Baustoffen die Oberfläche intakt bleibt. Abgewitterte Bestandteile der Oberfläche, wie loser Fugenmörtel, absandende oder abschalende Naturstein- oder Backsteinoberflächen müssen jedoch entfernt werden (Abb. 8.5).

8.3 Vorgehensweise beim Reinigen

Bereits im Stadium der Beratung oder Angebotsausarbeitung, spätestens jedoch ei- nige Wochen vor Arbeitsbeginn sollten geeignete Testflächen angelegt werden, auf denen durch Abreißfestigkeitsversuche die Haftung des Untergrundes und durch

Abb. 8.5 Melsungen,
Bartenwetzerbrücke.
Gereingtes und neu verfugtes
Brückengewölbe



Ausprobieren die optimale Reinigungsmethode ermittelt werden. Schon zu diesen ersten Überlegungen müssen unbedingt Gedanken über Art und Menge der anfallenden Reinigungsmittel und der zu entfernenden Stoffe unter Berücksichtigung der geringstmöglichen Belastung der Umwelt gehören. Dazu ist es auch geboten, sich mit der zuständigen Bauordnungsbehörde oder dem Umweltamt der Stadt oder des Kreises ins Benehmen zu setzen, um eine geeignete Konzeption zur Entsorgung zu erarbeiten. Dort erfährt der Handwerksmeister – sollte er dies nicht ohnehin bereits selber wissen – die gesetzlich geregelten Bestimmungen über die Zulässigkeit des Einleitens von Schmutz- bzw. Schadstoffen in den Baugrund oder in die örtliche Kanalisation. Sehr hilfreich sind dabei solche „*Vorläufigen Technischen Hinweise*“, wie sie z. B. das Bayer. Landesamt für Wasserwirtschaft im Jahre 1991 herausgegeben hat.

Erst mit den Ergebnissen, die aus den Testflächen gewonnen wurden, kann entschieden werden, welche Reinigungsmethode für das in Frage stehende Mauerwerk zum Einsatz kommt. Für das Reinigen von Mauerwerk gibt es auf dem Markt mittlerweile eine schier unübersehbare Fülle von Verfahren, Mitteln und dazugehörigen Geräten, die sich aber im wesentlichen in zwei Gruppen zusammenfassen lassen: einmal in überwiegend abrasive, entweder trockene oder nasse und zum anderen in chemische Verfahren.

8.3.1 Mechanische, trockene Verfahren

Die mechanischen, trockenen Verfahren bestehen aus Abbürsten, Abschleifen, Abarbeiten, Abschaben nach Erhitzen mit Heißluft, Abbrennen oder aus Abstrahlen mit Druckluft. Sie sind zumeist nur in geringem Maße abrasiv, können jedoch an hartnäckig verschmutzten Fassaden scheitern. Deshalb sollte man sie an Testflächen in schrittweisem Vorgehen in der genannten Reihenfolge ausprobieren. Erst wenn diese relativ behutsamen Arbeitsgänge nicht den gewünschten Erfolg bringen, sollten kräftigere Verfahren eingesetzt werden.

Bei den trockenen Reinigungsverfahren gelangen Kompressoren mit ausreichender Luftmenge und unmittelbar vor dem Druckkessel sitzenden Luft-Konditionierern sowie regelbare Trockenstrahlgeräte mit entsprechenden Düsen im Zusammenhang mit Luftkühlern zum Einsatz. Dabei können die Düsen derart genau geregelt werden, dass auch Fugen im Mauerwerk und schmale Putzrisse gereinigt werden können. Werden diese an Wänden im Innenraum z. B. bei großen Hallen und Kirchen eingesetzt, müssen sie mit einem leistungsfähigen Industriestaubsauger verbunden sein, um eine Verteilung des Staubes im Raum zu verhindern. Auch außen muss die Staubentwicklung beherrscht werden, indem man Luftbefeuhtungsdüsen an die Strahlgeräte anschließt. Dazu gehört selbstverständlich ein Abdecken der Arbeitsgerüste mit Planen. Der anfallende Staub kann auf diese Weise nicht in die nähere Umgebung dringen, lästige Staubemissionen werden verhindert. Wo die Voruntersuchung einen besonders großen Staubanfall erwarten lässt, müssen geschlossene Staubhauben eingesetzt und die Arbeiter mit Atemmasken ausgerüstet werden (Abb. 8.6).

8.3.2 Mechanische, nasse Verfahren

Dabei handelt es sich um Abwaschen mit Wasser, Abstrahlen mit Wasser ohne Druck, Abstrahlen mit Wasserdampf, Abstrahlen mit Druckwasser ohne Strahlmittel oder mit Strahlmitteln, schließlich um Abstrahlen mit Höchstdruckwasser. Wiederum sollten die Verfahren in der genannten Reihenfolge getestet werden, um das jeweils sanfteste Reinigungsverfahren herauszufinden. Ein besonders sanftes Strahlverfahren ist das JOS-Niederdruck-Rotationswirbelverfahren (Habermann 1991). Dabei prallt der Wasserstrahl nicht direkt auf die Wand, sondern wird zuvor in einer Düse unter Luftzugabe verwirbelt. Das verwirbelte Strahlwasser wirkt erheblich weniger zerstörerisch auf die oberflächennahen Steinpartien (s. Kap. 7.3).

Bei sehr hartnäckigen Verschmutzungen werden Strahlmittel erforderlich. Diese bestehen zumeist aus relativ weichen Granulaten wie z. B. Walnussgranulat und können durch Einsatz von Sanden in ihrem Grad der Abrasivität gesteigert werden. Bei Anwendung nasser Verfahren ist der Reinigungserfolg immer abhängig von der Saugfähigkeit der Fassade. Besonders günstige Resultate haben sich beim Abstrahlen mit dem Strahlmittel „Trockeneis“ ergeben. Dabei bleibt der Untergrund trocken.

Abb. 8.6 Mit Hilfe einer Staubkabine kann der die Fassade reinigende Handwerker sich selbst vor anfallendem Staub schützen



Bei Anwendung nasser Strahlverfahren müssen die Gerüste sorgfältig mit Planen umhüllt werden. Selbstverständlich müssen auch alle Öffnungen in der zu reinigenden Fassade wie Fenster, Türen, Luken, aber auch Risse, Löcher und Anschlüsse an Traufkästen, Windbretter und ähnlichem vor Beginn der Arbeiten wasserdicht geschlossen werden. Dies erfolgt in aller Regel durch Verkleben mit Folien oder Vermörteln der Risse und Löcher. Geschieht dies nicht, dringt das Strahlwasser samt Strahlgut durch die Fensterritzen oder unter dem Fensterbrett hindurch in den Innenraum ein und durchnässt angrenzende Wände mit ihren Lambrien, Fußböden mit Holzdielen oder Parkett und sogar die nahe am Fenster stehenden Möbel. Es können also hohe Schäden verursacht werden (Abb. 8.7).

Besondere Rücksicht muss freilich auf den vorhandenen Zierat der Fassade gelegt werden, dieser darf selbstverständlich nur von Hand und unter Anleitung eines fachkundigen Restaurators gereinigt werden (Abb. 8.8).

8.3.3 Chemische Verfahren

Das Reinigen mit Hilfe von Chemikalien, also mit Aqua Destillata, wäßrigen oder nichtwäßrigen Abbeizern, Abwaschen mit Wasser unter Zugabe von Tensiden, Auf-

Abb. 8.7 Sorgfältig mit Folien verschlossene Fenster verhindern das Eindringen von Strahlwasser



Abb. 8.8 Stuckdekor wie dieses Engelköpfchen in einer Muschel muss vom Restaurator gereinigt werden



tragen von dünnflüssigen Reinigungsmitteln und schließlich Auftragen von Reinigungspasten, ist auf jeden Fall umweltproblematischer als die mechanischen Methoden. Wäßrige Abbeizmittel wie Natron- oder Kalilaugen und heiße Soda- oder Ammoniaklösungen erfordern ein sehr sorgfältiges Nachwaschen mit Wasser. Nichtwässrige Abbeizfluide wie Spiritus, Benzol, Aceton oder gar die giftigen Chlorverbindungen Methylenechlorid, Trichloräthylen und Tetrachlorkohlenstoff dürfen

großflächig überhaupt nicht zum Einsatz gelangen. Solche aggressive Abbeizmittel sind auch deshalb bedenklich, weil während ihrer Anwendung Giftgase entstehen und in die Umwelt entweichen, welche die Gesundheit sowohl der ausführenden Arbeiter als auch die von Passanten beeinträchtigen. Wenn sie aber dennoch wegen der Hartnäckigkeit der Verschmutzung eingesetzt werden müssen, sind gemäß der Verordnungen der Bauberufsgenossenschaft und der Unfallverhütungsrichtlinien sorgfältige Schutzvorkehrungen zu treffen. Dazu gehören neben dem Einsatz gasdichter Sprühkabinen auch dichte Schutzanzüge mit Gesichtsatemmasken. Der entstehende Abfall muss mittels Saugdüsen in dichten Behältern aufgefangen werden.

Die meisten Abbeizer bestehen zu 60 bis 70 % aus Dichlormethan (Methylenchlorid) und verursachen in Verbindung mit Wasser Chlorkohlenwasserstoff, CKW-Emissionen. Diese werden überwiegend in die Luft und in geringen Mengen in Boden und Wasser abgegeben. Mittlerweile bietet der Markt aufgrund der verschärften Umweltschutzgesetze nur noch CKW-freie Abbeizer an. Allerdings sind auch diese keineswegs unproblematisch: Sie bewirken wenn auch andere, jedoch nicht minder umweltschädliche Emissionen und belasten die Umwelt allein schon wegen ihrer wesentlich längeren Einwirkungszeiten ebenfalls nicht unerheblich.

Die enorme Tiefenwirkung der heute am Markt zur Verfügung stehenden Abbeizer durch mehrere Farb- und Lackschichten hindurch in einem Arbeitsgang und der hohe Reinigungsgrad durch vollständige Beschichtungsentfernung beeinträchtigen die darunter liegende, mineralische Bausubstanz kaum. Es hat sich allerdings gezeigt, dass zur Entfernung komplexer Beschichtungsaufbauten spezielle Abbeizer benötigt werden, d. h. die optimalen Abbeizer von Farben müssen immer der konkreten Aufgabenstellung angepasst werden.

Jeder CKW-freie Abbeizer ist auf der Basis von Estern oder Alkoholen oder die neueste Generation auf wässriger Basis mit Aktivsauerstoff individuell zusammengesetzt. Die jeweiligen Anwendungsgebiete der Produkte überschneiden sich freilich. In sog. „intelligenten“ Gelen wird sogar die Lösemittelabgabe an die zu entfernende Farbschicht geregelt. Der Markt hält solche CKW-freie Produkte parat. Sie sind dichlormethan- und NMP-frei (N-Methyl-2-pyrrolidon), anwenderfreundlich und biologisch abbaubar.

8.3.4 Gefährdung der ausführenden Handwerker

Dichlormethanhaltige Abbeizer sind sehr gefährlich. Sie verursachen nicht nur Schläfrigkeit und Benommenheit, sondern können sogar die Atmung lähmen und zu einem Herz-Kreislauf-Stillstand führen. Die bei Abbeizarbeiten mit diesen Chemikalien bestehende Lebensgefahr hat sich leider bei zahlreichen, z. T. tödlichen Unfällen gezeigt. Messungen der Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG BAU) belegen, dass bei Tätigkeiten mit dichlormethanhaltigen Abbeizern der Arbeitsplatzgrenzwert – AGW – grundsätzlich überschritten wird. Bei Arbeiten in Räumen wird der AGW in der Regel um das Zehnfache, bei Arbeiten in Freien, z. B. an Fassaden, um das Fünffache überschritten.

Auf dichlormethanhaltige Abbeizmittel kann gemäß der Technischen Regel Gefahrstoffe TRGS 612 „Ersatzstoffe, Ersatzverfahren und Verwendungsbeschränkungen für dichlormethanhaltige Abbeizmittel“ (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2007) verzichtet werden, da für alle Beschichtungen, die mit dichlormethanhaltigen Abbeizmitteln entfernt werden können, auch geeignete wirksame dichlormethanfreie Abbeizmittel erhältlich sind. Auch bei Tätigkeiten mit dichlormethanfreien Abbeizmitteln hat der Arbeitgeber grundsätzlich Schutzmaßnahmen der Schutzstufe 2 (GefStoffV §§ 8 und 9) zu ergreifen. Eine Liste von dichlormethanfreien Abbeizern kann im Internet unter www.gisbau.de abgerufen werden.

Da Dichlormethan von Atemschutzfiltern nicht zurückgehalten wird, müssen umluftunabhängige Atemschutzgeräte zum Einsatz kommen, d. h. man benötigt Sauerstoffflaschen oder Kompressoren. Darüber hinaus werden für den Handschutz spezielle Fluorkautschuk-Schutzhandschuhe benötigt, die freilich höchstens zwei Stunden Schutz bieten. Diese Handschuhe kosten circa 50 € pro Paar. Beim Tragen von Schutzhandschuhen sind Baumwollunterzieh-Handschuhe empfehlenswert.

Aufgrund der hohen Risiken beim Einsatz von dichlormethanhaltigen Abbeizern hat das EU Parlament im Januar 2009 ein europaweites Verbot dieser Abbeizer beschlossen. Die europäische Verordnung (EU) Nr. 276/2010 bestimmt, dass ab dem 6. Dezember 2011 diese Stoffe nicht mehr verkauft werden dürfen. Ab dem 6. Juni 2012 ist dem gewerblichen Verwender auch die Benutzung von dichlormethanhaltigen Abbeizern verboten.

Viele Hersteller haben bereits reagiert und ihr Programm an Abbeizmitteln umgestellt. Aber auch dichlormethanfreie Abbeizmittel können den Menschen gefährden. Das mitgelieferte Sicherheitsdatenblatt sollte daher immer aufmerksam gelesen werden.

Die Verwendung des früher oft gebräuchlichen Quarzsandes als Strahlmittel ist aufgrund der ernsten Gesundheitsschäden (Silikose) seit vielen Jahren grundsätzlich verboten. Dieses Verbot war früher in der Unfallverhütungsvorschrift VBG 48 „Strahlarbeiten“ enthalten. Nach der Aufhebung dieser Unfallverhütungsvorschriften – UVV – bestimmt jetzt die Berufsgenossenschaftliche Regel – BGR 500 – im Kap. 2.24, dass Strahlmittel nicht mehr als 2 % an freier Kieselsäure (Quarz, Cristobalit und Tridymit) enthalten dürfen.

Eine Folge der Silikose können auch Krebserkrankungen der Lunge sein. Die TRGS 906 stuft deshalb Tätigkeiten, bei denen Beschäftigte alveolengängigen Stäuben aus kristallinem Siliciumdioxid in Form von Quarz und Cristobalit ausgesetzt sind, als krebserzeugend ein. Diese alveolengängigen Stäube entstehen insbesondere bei der Verwendung von Quarzsand als Strahlmittel.

8.4 Lärmschutz

Bei beiden mechanischen Verfahren ist die Lärmimmission von großer umweltbeeinträchtigender Bedeutung. Die Lärmschutzwerte nach der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift „AVV Baulärm“ müssen auf jeden Fall eingehalten werden.

Es dürfen daher nur möglichst lärmarme Geräte eingesetzt werden: Die zulässigen Grenzwerte sollten um mindestens 10 dB(A) unterschritten werden. Solche lärmarme Kompressoren sind durch das Umweltzeichen RAL-UZ 53 kenntlich gemacht. Außerdem helfen oft schon ein paar einfache Maßregeln, den Geräuschpegel zu mindern. Die ausführenden Betriebe sollten in jedem Falle darauf achten, dass ihre Mitarbeiter keine Geräte im Leerlauf betreiben und gegebenenfalls dort, wo der Lärm besonders unangenehm stört, Schallschutzwände errichten. Die Bauberufsgenossenschaft gibt weitere, in der Praxis bewährte Empfehlungen zur Lärmminderung.

8.5 Entsorgen von Schlämmen und Strahlgut

Zur Behandlung von Fassadenabwässern reicht es in keinem Falle aus, durch provisorische Filter wie z. B. einem alten Teppich die vorhandenen Feststoffe zu sammeln und das Abwasser ungehindert in den Boden versickern zu lassen. Auch die Einleitung von kontaminierten Abwässern in die örtliche Kanalisation ist nicht erlaubt. Hierfür gibt es örtliche Bestimmungen und die bundeseinheitliche Regelung in Gestalt des Merkblattes *ATV-DVWK – M 370– Abwässer und Abfälle aus der Reinigung und Entschichtung von Fassaden*, die die Erfordernis von Auffangvorrichtungen für Abwässer an Fassaden festlegt. Im Merkblatt wird eine Fassadenfreifläche von höchstens 300 m² zugegeben, bei der eine Auffangvorrichtung und eine weitergehende Abwasseraufbereitung entfallen darf. Voraussetzung dafür ist, dass nur klares Wasser ohne Einsatz von Chemikalien zum Einsatz kommt. In allen anderen Fällen muss das schmutzige Reinigungswasser in einer Folienwanne aufgefangen und am sichersten in eine dafür geeignete, mobile, für die Behandlung von Fassadenabwässern zugelassene Wasseraufbereitungsanlage mit Bauartzulassung gepumpt werden. Man kann das Abwasser aber auch in speziellen Fässern zur nächsten Sondermüllkippe transportieren und entsorgen. Gleches gilt für anfallende Farbschlämmen, chemisch verunreinigte Fassadenabwässer oder im Wasser befindliche Strahlmittel. Nur trockene Farbabfälle und Strahlmittel können wie Bauschutt entsorgt werden.

Für die Entsorgung von Fassadenabwässern gilt die „*Verordnung zur Einführung des europäischen Abfallkatalogs*“ EAKV und die „*Verordnung zur Bestimmung von besonders überwachungsbedürftigem Abfall*“. Aus der erstgenannten Verordnung resultiert eine Zuordnung der Abwässer nach dem Europäischen Abfall Katalog EAK, der einer jeden Abfallart einen eigenen Abfallschlüssel zuweist. Je nach Gefährlichkeit des Abfalls unterscheidet man nach drei Abfallkategorien: „nicht überwachungsbedürftigem“, „überwachungsbedürftigem“ und „besonders überwachungsbedürftigem“ Abfall. Danach gehören insbesondere Farb- und Lackschlämmen zu den letztgenannten Abfällen. Sie tragen die Abfallschlüsselnummern EAK 080107 und 190201. Für solche Abfälle dürfen auch auf der Baustelle nur spezielle, von zugelassenen Entsorgungsfachbetrieben zur Verfügung gestellte ASP-Behälter aufgestellt werden. Auch das Entsorgen der zum Abkleben der Fens-

Abb. 8.9 Unzureichende Folienrinne, die sofort nach den Abfallrichtlinien geändert werden muss



ter oder für Folienwannen eingesetzten Folien muss nach den Abfallrichtlinien ausgeführt werden (Abb. 8.9).

8.6 Wichtige Regeln beim Reinigen von Mauerwerk

8.6.1 Wahl der Reinigungsmethode

Für das Reinigen von Mauerwerk muss zunächst einmal durch eine sorgfältige Voruntersuchung gewonnene Klarheit über die anzuwendende Reinigungsmethode herrschen. Zu diesem Zweck legt man vor Ausführungsbeginn Testflächen an der Fassade an. Es wird nun geprüft, ob einfaches Abbürsten oder Abwaschen den Reinigungszweck bereits erfüllen oder ob stärkere Mittel wie Abstrahlen mit Druckluft, mit Druckwasser, mit Heißwasser oder mit und ohne Strahlmittel benötigt werden. Dabei kommt es immer auch auf das zu verwendende Strahlmittel, auf chemische Zusätze wie Tenside oder Netzmittel und auf die Strahldüse an. Den Einsatz eines bestimmten Verfahrens entscheidet auch seine Umweltverträglichkeit. Einem möglichst umweltschonenden Verfahren ist immer der Vorzug einzuräumen.

8.6.2 Abbeizen

Abbeizen sollte nur in sehr seltenen Fällen zum Einsatz kommen. Eine generelle Ablehnung CKW-haltiger Abbeizer und Reinigungsmittel muss aus Gründen des Arbeitsschutzes, des Immissionsschutzes und des Schutzes des Bodens und der Gewässer zur Selbstverständlichkeit werden. Daher ist es umso bedauerlicher, dass bisher eine europaweite Regelung z. B. über das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) mit einheitlichen Anforderungen oder Verboten bislang nicht zustande gekommen ist.

Abb. 8.10 Undichte Planen halten das Wasser des Strahlgerätes nicht zurück



8.6.3 Entsorgung

Abdeckungen mit Planen und Folien behindern das ungewünschte und umweltschädigende Verbreiten der Staubemissionen bzw. des unter Druck aufgespritzten Wassers in die Umgebung des zu reinigenden Mauerwerks (Abb. 8.10).

Die Chemikalien sollten durch Abflussrinnen oder Absauganlagen aufgefangen und durch geeignete Filter ausgesondert werden. Diese Maßnahmen müssen stets mit der zuständigen Bauordnungsbehörde, dem Umweltamt und dem Betreiber der Kläranlage abgestimmt werden. Schließlich ist bei allen Reinigungsvorgängen darauf zu achten, dass weder das Mauerwerk selbst infolge neuen Salzeintrags geschädigt, noch beteiligte und unbeteiligte Personen durch unsachgemäßen Umgang mit Reinigungsmitteln und -maschinen zu Schaden kommen.

Für eine Verminderung der Lärmimmissionen sorgen geeignete lärmgeschützte Baumaschinen und Schallschutzwände. Insbesondere die arbeitsschutzrechtlichen Vorschriften sind sorgfältig zu beachten: Geeignete Schutanzüge und Bauhelme sind selbstverständliche Pflicht.

8.6.4 Qualitätskontrolle

In jedem Falle aber – in schwierigen Fällen durch ein geeignetes bauchemisches Labor – muss geprüft werden, welche Stoffe sich auf der Fassade befinden und welche Strahlgüter, Reinigungsmittel oder Abbeizer die Reinigungsmaßnahme unbedingt verlangt. Danach richten sich dann auch die Entsorgungsvorkehrungen an der Baustelle. Diese Vorkehrungen müssen sicherstellen, dass die Vorschriften und Gesetze zur Verhütung von Umweltschäden eingehalten werden. Besonders wichtig sind hierbei, daher sei es noch einmal wiederholt, die Reduzierung der Staubemissionen,

der Lärmimmissionen, der Chemikalien in den Abwässern und die Vermeidung von neuem Salzeintrag in mineralische Fassaden.

8.6.5 Handwerklich saubere Arbeit

Reinigungsarbeiten dürfen nicht von gerade erst angelernten Kräften ausgeführt werden. Gerade die gleichmäßige Führung der Strahldüse im richtigen Abstand von der Wand muss während des gesamten Reinigungsprozesses gewährleistet sein. Es darf bei den eingesetzten Arbeitern kein Mangel an Erfahrung im Umgang mit Reinigungsgeräten, Kompressoren und den von ihnen entwickelten Drücken, Schläuchen, Strahldüsen, angeschlossene Staubbefeuchtungsgeräte und Absauganlagen, aber auch mit Reinigungsmitteln vorhanden sein. Hohes Verantwortungsbewusstsein für das Mauerwerk, aber auch für die Arbeiter und die Umwelt muss alle Entscheidungen hinsichtlich des richtigen Vorgehens leiten.

Deshalb sollte ein Betrieb, der solche Arbeiten ausführen will, sich von den jeweiligen Fachberatern der Hersteller von Reinigungsgeräten und -mitteln gründlich über alle anstehenden Fragen informieren lassen. Außerdem sollten die Mitarbeiter eines solchen Betriebs die Fortbildungsseminare, die Hersteller und Vertreiber von Strahlgeräten anbieten, wahrnehmen.

Mauerwerk zu konservieren bedeutet stets den Versuch, den Alterungsprozess eines Mauerwerks wenigstens für einige Dauer zum Stillstand zu bringen (s. Einleitung) und vor allem die Verwitterung der Steine aufzuhalten (Weber et al. 1985). Betrachtet man nur das hervorstechendste Merkmal am Verwitterungsvorgang, nämlich den damit immer verbundenen Bindemittelverlust, kann das Konservieren als bewahrende Maßnahme sich in der Hauptsache auf die Zufuhr von Bindemitteln in die Steinoberfläche oder in den gesamten Naturstein hinein beschränken.

Natursteine, die entweder als vom Bildhauer gefertigte Skulpturen auf der Gebäudedfassade und als Gartenplastiken oder als Werksteine in einem Mauerwerk eingesetzt wurden, haben die Baumeister schon seit vielen Jahrhunderten zu meist mit wenig Erfolg zu konservieren versucht. Dazu haben sie erhitztes Leinöl, auch Standöl genannt, Mohnöl und verschiedene Wachse eingesetzt. Auch der Grundanstrich der steinernen Statuen mit bleiweiß haltiger Farbe hat sicherlich zur Konservierung einiges beigetragen. Doch diese Konservierungsmaßnahmen waren niemals von ausreichender Dauerhaftigkeit, die Natursteine bildeten meistens schon nach 20–30 Jahren schwarze Krusten und Schalen, die zur Ablösung ganzer Statuenteile und weiter Mauerwerksbereiche führten. Der Verfasser hat bei der Anamnese der Baugeschichte vieler historischer Gebäude z. B. am Ansbacher Residenzschloss, an der St. Gumbertuskirche in Ansbach oder an den Gebäuden des Dominikanerklosters in Bamberg nachweisen können, dass immer wieder Oberflächenbeschichtung mit „gesottenem Leinöhl und Bleiweiß Farb“ wiederholt werden mussten. Gleichwohl konnten diese wenig wirkungsvollen Konservierungsverfahren die fortschreitende Verwitterung nicht aufhalten und so musste die zuständige Bauverwaltung im genannten Turnus den Verlust ganzer Steinpartieen anzeigen. Insbesondere die Abgase bzw. der Rauch aus den vielen mit Holz, später mit Kohle geschürten Einzelöfen in alten Städten verursachten damals schon eine derart schlechte Luftqualität und einen schwefelsäurehaltigen, „sauerer“ Regen, der insbesondere mit zunehmender Industrialisierung im 19. Jahrhundert zu erheblichen Schäden an den Mauerwerksoberflächen führte. Deshalb sah man sich auch in der Vergangenheit gezwungen, Fluate, Wasserglas, Barythydrat und Paraffine als Konservierungsmittel für Natursteinwände einzusetzen (Weber et al. 1985).

9.1 Konservierungsmittel

Seit dem Denkmalschutzjahr 1975 fing man an, dem in der Wiederaufbauphase nach dem Zweiten Weltkrieg anscheinend weitgehend vergessenen Konservieren erneut größere Aufmerksamkeit zu schenken. Die chemische Industrie entwickelte in den nachfolgenden Jahren für die Praxis taugliche Werkstoffe zur Konservierung von Natursteinen, die heute weitverbreitete Anwendung finden (WTA-Merkblatt 3–10-97/D).

Anforderungen an die Werkstoffe zur Konservierung von Natursteinen

- Eintrag von neuem, möglichst witterungsbeständigem, am besten minera-
lischem Bindemittel
- Eindringtiefe mindestens bis zu ungeschädigten Bereichen im Stein
- Bauschädliche Nebenprodukte wie Salze dürfen nicht gebildet werden
- keine Veränderung der Wasserdampfdurchlässigkeit
- keine Veränderung der thermischen Ausdehnung des Mauerwerks
- Bewahren der Farbwerte der Steinoberfläche
- Keine Krustenbildung
- Aufbau eines gleichmäßigen Festigkeitsprofils quer durch den Naturstein

Bereits die Missachtung einer einzigen dieser Anforderungen kann die Steinkonservierungsmaßnahme zum Fehlschlag werden lassen. Da jeder Naturstein anders auf die Konservierungsmittel reagiert, muss jeder Konservierungsmaßnahme selbstverständlich eine gründliche Untersuchung des Mauerwerks vorausgehen.

Würdigt man den Gebrauchswert heute bekannter Steinkonservierungsverfahren, so kann man solche,

- die keine Bindemittel abscheiden,
- nur gering einzudringen vermögen,
- die Oberfläche des Mauerwerks verändern oder gar
- bauschädliche Salze bilden,

von vornherein als untauglich verwerfen. Damit scheiden heute die alten Verfahren mit einem Auftrag auf die Mauerwerksoberfläche von Leim und Gelatine, Wasserglas, Flußsäure und Fluate, Lein- und Mohnöl, Wachse und Paraffine, Barytwasser oder gar Metallsalze (MOS-Verfahren) alle miteinander aus der Baupraxis aus (Weber et al. 1985).

Heute verbleiben in der Tat nur noch drei, allerdings sehr bewährte Konservierungsverfahren:

- Einbringen von oder Tränkung mit organischen Harzen wie Epoxid- und Acrylharze,
- Kieselsäureester, das sind Reaktionsprodukte aus Kieselsäure und entsprechenden Alkoholen, meist Äthanol und Methanol,
- Hydrophobierungsmittel

Abb. 9.1 Durch Volltränkung der Statue auf der Attika der SO-Fassade des Residenzschlosses in Ansbach weist im Gegensatz zur Attika selbst keinerlei Bewuchs mit Moosen oder Algen auf. Sie ist gleichsam steril



Aus der Gruppe der organischen Harze verwendet man zum einen die Epoxidharze entweder zur Verfestigung des Fugenmörtels und als Verfüllsuspensionen für Mauerwerksrisse und Hohlräume, was bereits ausführlich erörtert wurde (s. Kap. 7.2.4), und zum anderen die Acrylharze zur Tränkung von Natursteinen; ein Verfahren, das insbesondere beim Erhalt von Steinplastiken und -skulpturen in den letzten Jahrzehnten vielfach eingesetzt worden ist, aber wegen seiner das Originalmaterial stark verändernden Eigenschaften heute nur mehr selten zum Einsatz kommt (Abb. 9.1).

Somit verbleiben für die Steinkonservierung nur mehr die Kieselsäureethylester und die Hydrophobierungsmittel. Beide haben sich inzwischen am Markt durchgesetzt. Kieselsäureester sind monomolekulare und niedrigviskose FestigungsmitTEL. Sie können bis zu einem Wirkstoffgehalt von ca. 80 % verarbeitet werden und scheiden damit eine ausreichende Menge an Bindemitteln ab, um einem verwitterten Stein neue Festigkeit zu geben. Ihr größter Vorteil liegt jedoch darin, dass nur Bindemittel und keinerlei bauschädliche Nebenprodukte wie Salze gebildet werden. Zur Reaktion der Kieselsäureethylester wird ein Katalysator und Wasser benötigt. Heute kommen fast nur noch Einkomponenten-Systeme zur Anwendung, die weder sauer noch alkalisch reagieren. Vor Jahren kam als Wirkstoff außer Kieselsäureethylester auch Methylester zum Einsatz, der zwar noch mehr Bindemittel abscheiden konnte als jener, aber wegen seiner toxikologischen Nebenwirkungen wie Augenschleimhautreizung aus dem Verkehr gezogen werden musste.

Hydrophobierungsmittel durchdringen im Sinne einer Imprägnierung die Mauerwerksoberfläche und machen sie dabei wasserabweisend. Normalerweise sind mineralische Baustoffe hydrophil, d. h. sie saugen in ihren Kapillaren mehr oder minder schnell Wasser auf. Hydrophil und hydrophob sind Wortbildungen aus der altgriechischen Sprache: Hydrophil bedeutet soviel wie ein freundschaftliches, inniges Verhältnis zum Wasser, hydrophob dagegen das genaue Gegenteil davon, nämlich wasserabschreckend oder abwehrend. Bei der Saugfähigkeit kommt es auf den Benetzungswinkel der Kapillarwand an. Es handelt sich dabei um den Randwinkel, den ein Wassertropfen ausbildet, wenn er die Porenwand berührt. Wenn der Benetzungswinkel $>90^\circ$ beträgt, ergibt sich eine negative Steighöhe des Wassers in den Kapillaren, also eine Kapillardepression. Bei 180° Benetzungswinkel würde der Wassertropfen gleichsam über der Kapillarwand schweben. Geht der Randwinkel des Wassertropfens gegen 0° , dann handelt es sich um die Kapillare eines gut saugenden Baustoffs (s. Abb. 4.9).

Hydrophobe Oberflächen sind dadurch gekennzeichnet, dass der Benetzungswinkel größer als 90° ist. Daraus ergibt sich, dass bei Baustoffen mit derartig ausgestatteten Kapillaren sowohl die Benetzbarkeit als auch das kapillare Saugen in Zusammenhang mit Wasser aufgehoben wird. Rüstet man also hydrophile Oberflächen mit Imprägniermitteln oder Beschichtungsstoffen derartig aus, dass der Benetzungswinkel $>90^\circ$ wird, dann werden die Oberflächen hydrophob und stoßen andringendes Wasser ab. Infolgedessen gilt: Je größer der Benetzungswinkel wird, desto mehr wirkt die Oberfläche hydrophob (Born 1999).

Als Hydrophobierungsmittel verwendet man heute siliciumorganische Verbindungen wie Siliconharze, Siloxane, Silane und Kiesel säureethylester mit hydrophobierenden Zusätzen (s. Tab. 7.2). Da die erstgenannten Produkte keine Bindemittel abscheiden, sollten sie immer im Zusammenhang mit dem letztgenannten verwendet werden, um Oberflächen erfolgreich zu konservieren. Gleichwohl geben häufig auch hydrophobierende Anstriche allein schon einen ausreichenden Verwitterungsschutz. Allerdings müssen dabei immer die zu schützenden Natursteine selbst überprüft werden, ob sie eine Hydrophobierung benötigen. Es gibt durchaus Steinarten, die sich gar nicht oder erst nach einer entsprechenden Vorbereitung hydrophobieren lassen.

9.2 Durchführung von Konservierungsmaßnahmen

Schließlich bleiben für die Baustellenpraxis folgende Verfahren zur Konservierung einer Mauerwerksoberfläche:

- das Kiesel säureethylesterverfahren,
- das Kiesel säureethylesterverfahren in Kombination mit Hydrophobierungsmitteln.
- hydrophobierende Anstriche oder Beschichtungen.

9.2.1 Kieselsäureethylester und ihre Anwendung

Ein Steinkonservierungsverfahren beginnt stets mit der Reinigung der Mauerwerksoberfläche (s. Kap. 8). Manchmal ist dazu eine Vorfestigung erforderlich. Auf der gereinigten Mauerwerksoberfläche setzt man zur Steinkonservierung heute ausschließlich Kieselsäureethylester ein. Er wird niemals rein sondern immer in gelöster Form verwendet. Als Lösungsmittel dienen Alkohole bzw. Ketone. Die Konzentration sollte 70 % nicht unterschreiten, da sonst zu wenig Bindemittel gebildet wird. Außerdem sollte Kieselsäureethylester möglichst niedermolekular sein, was die Eindringtiefe verbessert. Der für die Reaktion erforderliche Katalysator sollte chemisch neutral sein. Heute gelangen nur noch Einkomponentensysteme zum Einsatz. Die Reaktionsgeschwindigkeit wird außerdem noch durch die Temperatur und das Wasser bestimmt. Meistens genügt das im Stein vorhandene Wasser, um die Reaktion in einer praxisfreundlichen Zeit ablaufen zu lassen. Eine zu schnelle Reaktion würde zur Verglasung der Mauerwerksoberfläche, eine zu langsame zu Verdampfungsverlusten führen. Bewährt haben sich Reaktionszeiten zwischen 14 und 28 Tagen. Solche Zeiten erreicht man bei Temperaturen zwischen 10 Grad und 20 Grad Mauerwerkstemperatur und einer relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 40 % und 70 %. Die Wintermonate scheiden also für Konservierungsmaßnahmen mit Kieselsäureethylestern aus (Weber et al. 1985).

Die in der Voruntersuchung festgelegte Menge des gewählten Präparates bringt man mit Flut- oder Sprühgeräten auf. Als Arbeitsgeräte haben sich Airlessanlagen, Elektropumpen, Handsprühgeräte und ähnliches bewährt. Es wird jedenfalls ohne Druck gearbeitet, denn es ist ein Irrtum, zu glauben, dass man mit Druck eine größere Eindringtiefe erreichen würde. Unter Druck würde das Präparat zu stark versprüht oder vernebelt werden. Andererseits sollte man Kieselsäureethylesterpräparate auch nicht mit einem Pinsel auftragen, da sich dabei die aufgetragene Materialmenge nicht ausreichend kontrollieren lässt. An beweglichen Objekten wie Statuen und einzelnen Steinen lassen sich auch Tauch- und Kompressenverfahren einsetzen (Weber et al. 1985).

Die Tränkung selbst wird in mehreren Teilschritten vorgenommen. Die Parameter Saugfähigkeit des Steins und erforderliche Eindringtiefe bestimmen die Anzahl der Einzeltränkungsschritte. Im Regelfall reichen 4–6 Tränkungen nacheinander aus. Dabei fasst man immer zwei bis drei Einzeltränkungen zu einem Zyklus zusammen und so ergibt sich folgender zu empfehlender Ablauf der Tränkungsmaßnahme (Weber et al. 1985):

- 1. Zyklus: 3 Einzeltränkungen nass in nass im Abstand von etwa 10 Min, Wartezeit von 30–40 Min
- 2. Zyklus: 3 Einzeltränkungen nass in nass im Abstand von etwa 10 Min
- 3. Zyklus: 3 Einzeltränkungen nass in nass im Abstand von etwa 10 Min

Die Tränkungen sollten immer am gleichen Tag hintereinander ablaufen und keinesfalls an aufeinanderfolgenden Tagen vorgenommen werden, d. h. das Mauerwerk sollte in geeignete Teillächen eingeteilt werden, um jede Teilläche an einem einzigen Tag tränken zu können. Nach der letzten Tränkung muss man die Mauerwerksfläche mit einem reinen Lösungsmittel nachwaschen, um Verkrustung, Ver-

glasung und Verfärbung, aber auch Bindemittelanreicherung an der Oberfläche zu vermeiden. Als Lösungsmittel empfiehlt die Literatur Alkohole und Ketone.

Folgendes muss beim Einsatz von Kieselssäureestern beachtet werden:

- Frisch behandelte Oberflächen müssen vor Regen geschützt werden.
- Die Verarbeitungstemperatur sollte nicht über 25 °C liegen, sonst treten Verdampfungsverluste des Wirkstoffes auf.
- Frisch gefestigte Oberflächen müssen durch geeignete Gerüstplanen vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt werden.
- Die Untergrenze der Verarbeitungstemperatur liegt bei 5 °C.
- Eine Wartezeit von 14–28 Tagen ist einzuhalten, bevor weitere Maßnahmen wie Steinergänzung, Verfugen oder Hydrophobieren an der Fassade begonnen werden können.
- Eine Beschleunigung durch Zugabe von Wasser oder durch Zusatz von weiteren Katalysatoren ist nicht zu empfehlen, da es zumeist zu nicht mehr kontrollierbaren Reaktionsgeschwindigkeiten kommt.
- Es entsteht pro Molekül des Esters ein Molekül Kieselgel als neues Bindemittel. Deshalb dürfen die marktüblichen Kieselssäureethylesterpräparate nicht verdünnt werden.

Grundsätzlich sollte der Umgang mit solchen Chemikalien nur von Fachleuten vorgenommen werden, die mit diesen Präparaten vertraut sind. Dafür gibt es heute Bautenschutz-Fachplanungsbüros, die Materialart, Materialmenge, Eindringtiefe und Verfahrensablauf festlegen.

9.2.2 Hydrophobierungsmittel und ihre Anwendung

Die Hydrophobierung ist bei sehr saugfähigen Natursteinmauerwerk unumgänglich und hat sich insbesondere bei Tuffsteinen besonders bewährt. Allerdings schließen eine zu hohe Versalzung und kapillar aufsteigende Feuchte eine Hydrophobierung aus. Eine Voruntersuchung muss klären, welches Präparat sich in welcher Menge für den vorliegenden Naturstein eignet bzw. eine optimale Hydrophobierung zulässt.

Als Hydrophobierungsmittel setzt man farblose, in organischen Lösungsmitteln oder Wasser gelöste Silane, Siloxane und Siliconharze, weniger häufig Metallseifen und Acrylharze ein, die einen hydrophilen Baustoff hydrophob imprägnieren. Dabei verleihen sie ihm wasserabweisende Eigenschaften, indem sie seinen Benetzungswinkel auf >90° erhöhen. Der Wirkstoffgehalt im Hydrophobierungsmittel hängt von der gewählten Wirkstoffart ab: z. B. werden Siliconharze mit einem Wirkstoffgehalt von 5 % eingesetzt, hydrophob eingestellte Kieselssäureester mit ca. 70 % Wirkstoff. Neben dem Wirkstoff spielt das Lösungsmittel eine entscheidende Rolle: Es transportiert den Wirkstoff bis in eine ausreichende Tiefe in den Stein. Meist verwendet man als Lösungsmittel aromatische Kohlenwasserstoffe im Siedebereich zwischen 120 und 160 Grad. Silane werden zumeist in Alkohol gelöst und so verarbeitet. Sie sind vorwiegend für Betonwände geeignet. Für Mauerwerk kommen eher Siloxane und Siliconharze zur Anwendung (Weber 1986).

Kriterien für ein Hydrophobierungsmittel

- Reduzierung der Wasseraufnahme; ein maximaler w -Wert = $0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ darf nicht überschritten werden.
- keine wesentliche Reduzierung der Wasserdampfdurchlässigkeit; ein maximaler s_d -Wert = $2,00 \text{ m}$ darf nicht überschritten werden.
- Resistenz gegen die Alkalität des Kalks und des Zements
- UV-Beständigkeit; es darf bei Sonneneinstrahlung nicht abgebaut werden, sonst kommt es zu einer Verfärbung des Untergrunds.
- eine möglichst große Eindringtiefe, um eine möglichst lange Dauer der Wirksamkeit zu erreichen.
- klebfreies Abtrocknen, um Schmutz abzuweisen.

9.2.3 Der Lotoseffekt

Bei einem Lotosblatt erzeugt eine Schicht aus feinen Wachskristallen eine derart mikrofeine Oberflächenstruktur, dass Wasser auf ihm tropfenförmig abperlt. Die hydrophobe Blattoberfläche ist schier unbenetzbare. Hydrophile Staubpartikel saugen sich am Wassertropfen fest, während dieser über das Blatt rollt, und werden vom Wasser mitgenommen, wenn es schließlich abtropft.

Das Vorbild des Lotosblattes in der Natur regte die Werkstoffwissenschaftler an, Beschichtungen von mineralischen Baustoffen zu entwickeln, die den gleichen Effekt aufweisen. Hydrophobe Beschichtungen mit Siliconharz ergeben, wie bereits dargestellt, in den Kapillaren des Mauersteins zwar einen Benetzungswinkel zwischen 120° und 125° , beim Lotoseffekt müssen aber etwa 145° Benetzungswinkel erreicht sein, also ist eine deutliche Steigerung der Oberflächenhydrophobie erforderlich. Diese kann man mit Hilfe geeigneter Fassaden- bzw. Mauerwerksoberflächenbeschichtungssystemen herstellen. Die Oberflächen entwickeln dann bei Beregnung selbstreinigende Eigenschaften, d. h. sie werden weniger schnell verschmutzen. Die idealerweise stets saubere, staubfreie Oberfläche eines Mauerwerks böte außerdem biologischem Befall mit Mikroorganismen in Form von Bakterien, Algen und Moosen keinen Nährstoff an, und ersparte so zusätzlich eine biozide Ausrüstung des Mauerwerks (Born 1999).

Um nun diesen Lotoseffekt zu erreichen, setzte man zunächst ein Bindemittel mit der erforderlichen Oberflächenhydrophobie ein. Dafür eignete sich besonders gut eine Siliconzemulsion mit einem Benetzungswinkel von 125° . Jetzt mussten noch Füllstoffe gefunden werden, die in ihrer Oberflächenstruktur den Wachskristallen des Lotosblattes sehr ähneln. Auch die Füllstoffe mussten selbstverständlich hydrophob eingestellt werden, damit das Beschichtungssystem einen ausreichenden Langzeiteffekt aufweist. Solche Beschichtungsstoffe hat man inzwischen entdeckt und patentieren lassen. Mit derart komponierten Oberflächenbeschichtungen ist es in der Tat heute möglich, eine Mauerwerksoberfläche zu hydrophobieren und ihr gleichzeitig eine selbstreinigende Ausstattung zu verleihen.

Die Selbstreinigungsfähigkeit gemäß dem Lotoseffekt von wasserabweisenden nanostrukturierten Oberflächen wurde in den 1970er Jahren von Wilhelm Barthlott entdeckt. Weiterhin sind Produkte, die auf die von Barthlott entwickelte technische Lehre zur Umsetzung des Selbstreinigungseffekts zurückgehen, durch die Marken „Lotus-Effekt“ bzw. „Lotus-Effect“ international umfassend geschützt. Exklusiver Markeninhaber ist die Sto AG in Stühlingen, Hersteller unter anderem der Fassadenfarben „Lotusan“, die 1999 von der Sto AG als erstes kommerzielles Produkt in Umsetzung der Lehre von Barthlott auf den Markt eingeführt wurde.

Um eine Natursteinmauer erfolgreich instandzusetzen, können neben den Reinigungs- und Sanierungsmaßnahmen zusätzlich noch flankierende Maßnahmen erforderlich werden. Diese können aus baukonstruktiven Verbesserungen, Sanierputz, wärmedämmenden Maßnahmen, Putzen oder Beschichtungen bestehen. So kann ein farbiges Angleichen der restaurierten Flächen mit Hilfe von Farblasuren oder gar eine Farbfassung der Natursteine notwendig werden (Abb. 10.1).

10.1 Baukonstruktive Verbesserungen

Prinzipiell sollte man nach einer Instandsetzungsmaßnahme am Mauerwerk über baukonstruktive Verbesserungen nachdenken. Das Mauerwerk sollte, wenn möglich, verputzt werden. Dies kann mit normalem Außen- und Innenputz, aber auch mit Sanierputz geschehen. Mauerwerkskronen müssen sorgfältig gegen eindringendes Regenwasser geschützt werden. Dafür gibt es sowohl mauertechnische Kappen, Grasbewuchs oder Verblechungen (Abb. 10.2).

Ein besonderes Augenmerk muss auf den Mauerwerksfuß und seinen Umgriff gelegt werden. Wir weisen deswegen hier noch einmal auf das bereits im Zusammenhang mit dem Einbau einer Dränage gesagte (s. Kap. 7.1.3).

10.1.1 Steinergänzung

Für die Wiederherstellung der ursprünglichen Oberfläche einer Naturstein- oder Backsteinmauer haben sich zwei Steinergänzungsverfahren bewährt: das sogenannte „Reprofilieren“ mit Restauriermortel und das Einsetzen von neuem Stein, die sog. „Vierung“. Die Mindestkantenlänge einer steinmetzmäßigen Vierung soll 10 cm betragen und die Einbindetiefe mindestens 8 bis 10 cm. Eine Vierung soll keinesfalls vorhandene Fugen überbrücken. Das Einsetzen von zementgebundenen Kunststeinen dagegen muss wegen der kaum beherrschbaren bauphysikalischen Verschiedenheit der Materialien abgelehnt werden (Abb. 10.3).

Abb. 10.1 Fulda, Stadtkirche. Die mittlere Sandstein-Travée wurde rot gefasst



Grundsätzlich wird Naturstein am besten mit dem gleichen Naturstein und Backstein mit Mauerziegeln repariert, vor allem dann, wenn er hinreichend witterfest ist. Dabei soll der neue Stein in seinen Materialkenndaten sowie in Farbe, Textur und Struktur dem Altstein weitestgehend entsprechen, weil sonst, auf längere Zeit gesehen, die Gefahr einer unterschiedlichen Verwitterung besteht. Selbstverständlich muss auch der neue Fugenmörtel in der Technik des Verfugens und in der Farbigkeit an den alten angeglichen werden. Da aber oftmals allzu weiche Steine in den Mauern Verwendung fanden, muss natürlich schon darüber nachgedacht werden, einen wesentlich witterungsbeständigeren Stein anstatt des vorhandenen weichen einzusetzen. So hat man bei der Sanierung der Außenwände des Regensburger Doms die weichen Sandsteine gegen wesentlich härtere Quarzsandsteine ausgetauscht. Hier haben offenbar die unerträglich hohen Kosten des laufenden Bauunterhalts die Bedenken der Denkmalpflege zurückgewiesen (Habermann 1991; Schuller 1989).

Sehr häufig wird aus Kostengründen der morbide Naturstein durch hydraulische Restaurier- oder Steinergänzungsmörtel ersetzt. Die moderne Bindemittelindustrie ist durchaus in der Lage, mit geeigneten hydraulischen Bindemitteln – aufgebaut auf Kalkhydrat und Trass, hydraulischem Kalk und Weißzement – unter Verwendung bestimmter Sieblinien bei den Zuschlagstoffen natursteinähnliche Mörtel zu

Abb. 10.2 Mauerkronen.
 Grasbewuchs: gute Dauerhaftigkeit; waagerechter Abschluss: ungeeignet; Bischofsmütze aus Werkstein: guter Schutz gegen eindringendes Wasser; Bischofsmütze gemauert: keine dauerhafte Lösung; geneigter Abschluss: keine dauerhafte Lösung; dachförmiger Abschluss: mittelmäßige Dauerhaftigkeit. Die nachhaltigste Lösung wäre eine überkragende oberste Platte mit einer ausreichenden seitlich Tropfnase

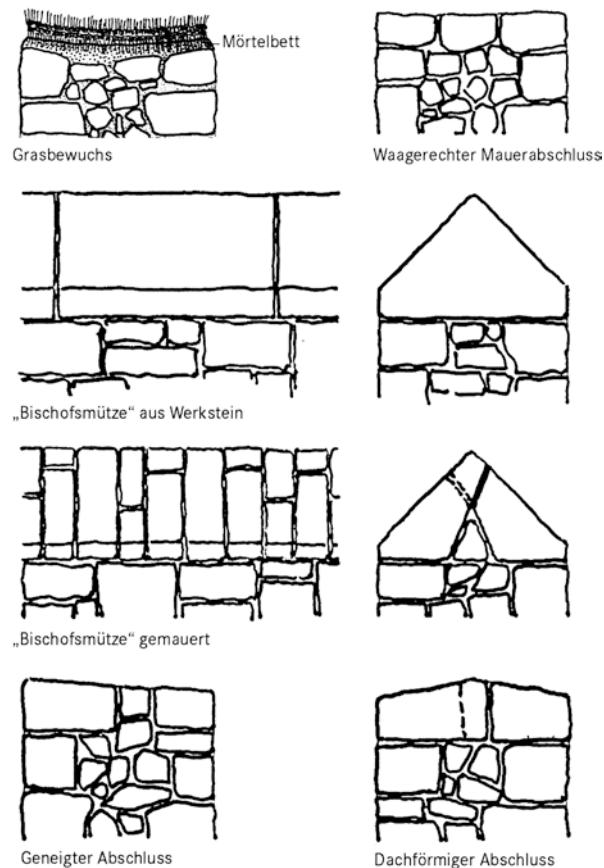


Abb. 10.3 Melsungen, Bart-en-wetzerbrücke. Die obersten maroden Geländersteine wurden durch Reprofilierungsmörtel im Abgussverfahren ersetzt



formulieren. Dabei handelt es sich um mineralische, häufig acrylatvergütete Werk-trockenmortel nach DIN 18 557. Daneben gibt es auch kunststoffmodifizierte Restauriermortel, die zusätzlich noch Polymere enthalten. Die dritte Gruppe stellen die reaktionsharzgebundenen Restauriermortel dar, die als alleiniges Bindemittel Reaktionsharz nach DIN 16 945 enthalten, das durch Polymerisation bzw. durch

Abb. 10.4 Schadhafte Fensterverdachung aus Sandstein. Der geschädigte Bereich wurde ausgestemmt und mit Reprofilierungsmörtel repariert



Polyaddition erhärtet (Scholz 1999). Außerdem gibt es noch durch Kieselgel gebundene Restauriermörtel mit den Zuschlagstoffen Quarzmehl oder Quarzsand, die wasser dampfdurchlässig formuliert sind. Alle Restauriermörtel lassen sich an die vorgefundene Steinoberfläche farbig anpassen.

Restauriermörtel sollte niemals großflächig d. h. nicht mehr als 100 cm² oder für tiefegehende Reparaturen eingesetzt werden, sondern immer nur für kleine Reparaturen am Mauerwerk. Ganze Steine aus solchem Mörtel nachzubilden und sie dann bildhauerisch zu bearbeiten, sollte besser unterbleiben. Es können nämlich, ähnlich wie beim Beton, erhebliche Probleme auftreten, besonders dann, wenn der Restauriermörtel zusätzlich mit Edelstählen armiert werden muss, denn am Stahl kann sich Kondenswasser bilden. Auch das unterschiedliche Witterungsverhalten von Restauriermörtel und Naturstein muss beachtet werden. Besonders problematisch stellt sich der Einsatz von Restauriermörteln dar, wenn nur gebrochene Kanten und bestoßene Oberflächen beispielsweise eines Natursteingesimses repariert werden sollen (Abb. 10.4).

Der Mörtelauftrag muss nämlich auf alle Fälle eine gewisse Mindeststärke haben, sonst wird er sehr schnell wieder abgesprengt. Deshalb muss der Naturstein an den Reparaturstellen entsprechend tief, in der Regel wenigstens 20 mm, abgearbeitet werden. In diesen Fällen kann nur mit kunststoffmodifizierten Mörteln PCC schadensfrei gearbeitet werden. Es empfiehlt sich daher, zu überprüfen, ob in solchen Fällen nicht ein Austauschen der Werksteine am Gesims gegen neue, eine sog. „Vierung“, sinnvoller und sogar kostengünstiger ist (WTA-Merkblatt 3-8-95/D). Bei geringfügigen Fehlstellen ist zu überlegen, ob man sie nicht in diesem Originalzustand belassen kann (Abb. 10.5).

Abb. 10.5 Schadhafte Fens-
terverdachung aus Sandstein.
Die geringfügige Bestoßung
der Kanten muss nicht unbe-
dingt repariert werden



10.2 Sanierputz

Hat man die Außenwände standsicher gemacht und nachträglich innen wie außen vertikal und horizontal gegen andringende Feuchte abgedichtet, empfiehlt sich als weitere Oberflächenbehandlung im Innenraum und außen am Mauerwerkssockel der Sanierputz, zumal wenn die Oberfläche der Mauern sehr versalzen ist. Die Behandlung hängt also vom Versalzungsgrad ab. Der Sanierputz ist in der Lage, die Auskristallisierung der Salze in seinen großen Porenräumen zu ermöglichen, ohne dass seine Oberfläche zermürbt wird.

10.2.1 Wie funktionieren Sanierputze?

Im WTA-Merkblatt 2-2-91/D (1991): Sanierputzsysteme heißt es:

Sanierputzsysteme dienen zum Verputzen feuchter und/oder salzhaltiger Mauerwerke. Baustoffsäädigende Salze werden im Putz eingelagert und somit von der Putzoberfläche fern gehalten. Eine hohe Wasserdampfdurchlässigkeit des Putzsystems bewirkt günstige Austrocknungsbedingungen für das Mauerwerk. Sanierputze – WTA sind demnach keine Sperrputze.

Die wichtigsten Eigenschaften der Sanierputze/WTA sind demzufolge:

- hohe Porosität = großes Porenvolumen
- gute Wasserdampfdurchlässigkeit
- erheblich verminderte kapillare Leitfähigkeit.

Normputze nach DIN 18 550 sind nicht in der Lage, dauerhaft den Feuchtigkeitsaustausch auf dem Diffusionswege zu ermöglichen, ohne dass durch die Feuchte

Tab. 10.1 Eigenschaften von Grundputz/WTA

Eigenschaft	Dimension	Prüfung nach	Anforderung
<i>Frischmörtel</i>			
Konsistenz	(cm)	5.2.1	$17,0 \pm 0,5^a$
Luftporengehalt	(V-%)	5.2.3	≥ 20
<i>Festmörtel</i>			
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ^b	–	5.3.2	≤ 18
Druckfestigkeit βd	(N/mm ²)	5.3.4	\geq Sanierputz
Kapillare Wasseraufnahme W 24	(kg/m ²)	5.3.6	$\geq 1,0$
Wassereindringtiefe h	(mm)	5.3.7	≥ 5
Porosität ^c	(V-%)	5.3.8	≥ 45

^a Richtwert, Herstellerangabe

^b Ausgleichsputze; Porengrundputze nur bei Erstprüfung und nach Rezepturänderung

^c Nur Porengrundputze

gelöste bauschädliche Salze an die Putzoberfläche wandern, dort auskristallisieren und durch ihr sehr großes Kristallvolumen die Putzstruktur aufsprengen. Solche Putze sind nur bei trockenem Mauerwerk sinnvoll.

Für solches Mauerwerk wurden spezielle Putze entwickelt, für die sich die Bezeichnung „Sanierputz“ in der Baupraxis durchgesetzt hat und auf die in DIN 18 550 Teil 2 Abschn. 6.2 ausdrücklich hingewiesen wird. Es handelt sich dabei um Putze, die dem WTA-Merkblatt 2–2-91/D (1991) entsprechen. Sanierputze/WTA bestehen aus Werk trockenmörteln mit hoher Porosität und Wasserdampfdurchlässigkeit bei gleichzeitig erheblich verminderter kapillarer Leitfähigkeit. Sie sind also in der Lage, einen großen Porenraum anzubieten, den Durchgang von Wasserdampf zu erleichtern und Wasser selbst kapillar nur vermindert zu leiten. Sanierputze sind deshalb stets hydrophob eingestellt. Sanierputze/WTA müssen dagegen auf Dauer mit ihren großen Poren in der Lage sein, auskristallisierende Salze ohne Sprengdruck aufzunehmen und dennoch diffusionsoffen zu bleiben. Deshalb kommt es auf ihre Porengeometrie an (s. Kap. 4.1), d. h. das Porenvolumen muss weitaus größer sein als das normgerechter Putze (Meier 2002, Tab. 10.1).

10.2.2 Voruntersuchung

Feuchte- und salzbelastete Mauerwerke finden sich sowohl außen in den Fassaden als auch in den Innenwänden. Selbstverständlich muss erst die Ursache für die eingedrungene Feuchte und die damit verbundene Salzausblühung ermittelt sein, ehe an den Einsatz von Sanierputzen gedacht werden kann. Insbesondere folgende Schadensbilder sind näher zu untersuchen (s. Kap. 5.2):

- Anstrichabplatzungen, beginnende Putzausblühungen vor allem im Haussockelbereich
- Weiße Krusten auf den Mauersteinen (im Volksmund meist als „Salpeter“ bezeichnet)
- Fehlende horizontale und vertikale Sperrsichten gegen andringende Feuchte

Abb. 10.6 Total versalzene Kellerwände



- Hygrokopische Putzschäden
- Hausgemachte, anthropogene Feuchteschäden, verursacht durch perforierte Dachrinnen, fehlende Regenrohre, undichte Dächer, undichte Fenster, etc.
- Wasseraufnahme durch Kondensation
- Wasseraufnahme durch kapillare Kondensation

Durch geeignete Probenahme muss eine Feuchte- und Salzbilanz gezogen werden. Dabei wird die kapillare Wasseraufnahme in Masse-% bestimmt und der Durchfeuchtungsgrad errechnet. Schließlich wird der Anteil an bauschädlichen Salzen im Labor ermittelt. Die Auswertung dieser Daten lässt ein Feuchteprofil erkennen, das die Art der Feuchteaufnahme im Mauerwerk diagnostizieren lässt (s. Kap. 6.7). Sollte es sich bei der Feuchte hauptsächlich um kapillar aufsteigende Nässe handeln, so muss eine Sperrsicht ins Mauerwerk eingebracht werden. Bei hygrokopisch eindringender Feuchte muss der kontaminierte Putz abgeschlagen, an schwer belasteten Oberflächen sogar das Mauerwerk ausgetauscht werden. Erdberührte Mauerwerke z. B. in Hauskellern müssen gegen Feuchte gemäß DIN 18 195 „*Bauwerksabdichtungen*“ Teil 4.6 mit einer vertikalen Sperrsicht und einer Drainage versehen sein (s. Kap. 7.1.2, Abb. 10.6).

Eine weitere wichtige Vorbedingung muss die Gewährleistung der Standsicherheit des Mauerwerks und der Tragfähigkeit seiner Oberfläche sein. Sind an alten Gebäuden Risse sichtbar, muss geprüft werden, ob diese noch dynamischer Natur oder inzwischen zur Ruhe gekommen sind. Dies lässt sich durch die herkömmliche Gipsmarke oder genauer durch einen Setzdehnungsmesser feststellen (s. Kap. 6.4). Auch der Verschmutzungsgrad der Rissflanken ist ein guter Parameter dafür. Nach Abschlagen des kontaminierten, geschädigten Putzes lässt sich rasch feststellen, ob die Oberfläche des Mauerwerks noch tragfähig ist. Sind Steine lose, Fugenmörtel fast ohne Bindemittel oder größere Löcher im Mauerwerk vorhanden, müssen diese zunächst maurermäßig bearbeitet oder mit Kieselsäureethylester verfestigt werden.

Erst wenn alle Ursachen für die Putzschäden erkannt sind und zweifelsfrei feststeht, dass es sich um nasses, versalzenes Mauerwerk handelt, dessen Oberfläche abgetrocknet, dessen Tragfähigkeit wiederhergestellt und dessen Wassernachschnitt

Abb. 10.7 Der versalzene Putz wurde abgeschlagen, die Wände gesäubert und die Fugen ausgekratzt



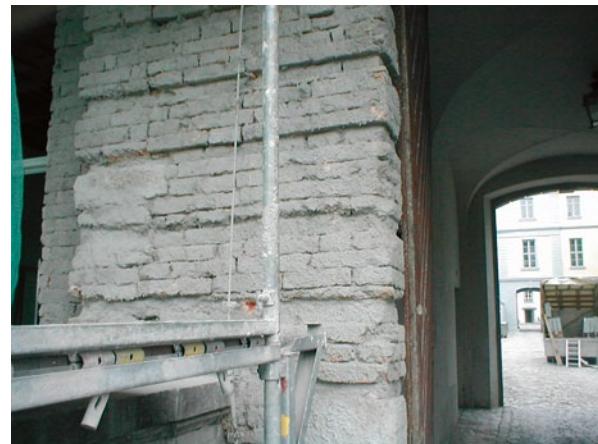
dauerhaft unterbunden ist, kann Sanierputz/WTA sinnvoll eingesetzt werden (Maier et al. 2007).

10.2.3 Erforderliche Arbeitsgänge

Der Alputz wird bis wenigstens 80 cm über die geschädigte Zone hinaus abgeschlagen. Die Ränder der Feuchtestellen im Putz zeigen sich in Form eines mäandrierenden Feuchtesaums, d. h. als ein unruhig auf und ab verlaufender weißlicher Rand der kontaminierten Putzfläche. Dabei muss ein gerader Grenzverlauf zwischen abzuschlagendem und verbleibendem, gesundem Alputz festgelegt werden. Er sollte sich an vorhandenen, optischen Fassadenlinien wie Baufugen, Gesimsen oder einer Flucht entlang der Oberkanten von Fenstern oder -brüstungen ausrichten. Dies deshalb, weil normaler Außenputz das Regenwasser aufsaugt, während es der hydrophob eingestellte Sanierputz abweist. Der Sanierputz zeigt sich demzufolge bei Regen als deutlich hellere Fassadenfläche, die sich zunächst nach dem Austrocknen wieder an die Alputzfläche angleicht. Dieses unterschiedliche Verhalten bei Regen erzeugt in wenigen Jahren einen deutlich sichtbaren, unterschiedlichen Verschmutzungsgrad der Wandoberfläche, der bei nicht sorgfältig gestalteter Putzgrenze die gesamte Fassade verunstalten kann. Durch nachträgliches Hydrophobieren des Alputzes der Fassade durch Imprägnierung mit Produkten auf Siloxanbasis lässt sich dies allerdings mehr oder weniger ausgleichen (Hettmann 1993, 1994).

Das Abschlagen des versalzenen Putzes muss sorgfältig ausgeführt werden. Der Putz muss gänzlich von der Steinoberfläche entfernt werden, was zumeist durch gründliches Abbursten geschieht. Bei hartnäckigen Putzstellen muss der Putz mit Hilfe abrasiver Methoden wie z. B. Abblasen mit Druckluft, Abstrahlen, etc. entfernt werden. Auch die Mauerwerksfugen müssen 50 mm, wenigstens doppelte Fugenbreite tief, bei losem Fugenmörtel bis hinunter zum festen, bindemittelhaltigen Bereich ausgeräumt werden. Für das Fugenausräumen gibt es mittlerweile sehr geeignete Druckluft- oder Strahlgeräte mit entsprechend kleinen Düsen (s. Kap. 8.3, Abb. 10.7).

Abb. 10.8 Spritzwurf auf sehr weichem Backsteinmauerwerk



Die kontaminierten Putzreste werden zusammen mit ihren Farbbeschichtungen täglich entfernt, um Rückwanderungen von Salzen zu vermeiden. Sie werden in Containern als Bauschutt entsorgt. Werden trotz aller Bedenken nasse Reinigungsverfahren eingesetzt, muss die entstehende Schlämme als Sondermüll in Fässern entsorgt werden. Dafür ist eine aufwendige Baustelleneinrichtung erforderlich. Bei solchen Arbeiten müssen die Gerüste mit entsprechenden Planen gesichert werden (s. Kap. 8.5).

Salz- und feuchtegeschädigte Mauerwerke müssen in der Regel vor dem Aufbringen eines Sanierputzsystems entsprechend vorbereitet werden. Insbesondere altes Mischmauerwerk aus Back- und Natursteinen muss mit einem geeigneten Putzträger versehen werden, z. B. mit einem Rabitz-, einem Ziegeldraht- oder einem Kunststoffgewebe. Bei besonders schlechtem Putzgrund sollte ein Putzträger aus Edelstahlmatten mit Abstandshaltern angedübelt werden.

Ist das Mauerwerk sauber abgebürstet, vorhandene Löcher zugemauert, die Fugen ausgekratzt und die schlechten Stellen als Putzgrund mit Gewebe wieder tragfähig gemacht, dann wird frisch ausgefugt, um eine möglichst gleichmäßige Oberfläche zu erreichen. Anschließend sollte ein Spritzwurf aus zum Saniersystem passendem Zementmörtel netzförmig als Haftbrücke aufgebracht werden. Insbesondere bei Natursteinmauerwerk sollte auf den Spritzwurf nicht verzichtet werden. Ein Weglassen des Spritzwurfs kann man im Grunde nur bei kleinformativem Backsteinmauerwerk empfehlen. In der Regel sollte der Spritzwurf ungefähr 60 % der Putzgrundfläche bedecken und darf eine Schichtdicke von 5 mm nicht überschreiten (Abb. 10.8).

Bei sehr ungleichmäßigen, inhomogenen oder zerklüftetem Mauerwerk muss vor dem eigentlichen Sanierputz ein im gewählten Sanierputzsystem passender Ausgleichsputz, ein sog. „*Porengrundputz*“, aufgetragen werden, um eine ebenmäßige Schicht für den späteren Sanierputzauftrag zu erhalten. Nur so ist die gleiche Schichtdicke überall auf der Wand zu gewährleisten. Da es sich bei Sanierputzen um mineralische Baustoffe handelt, ist bei ungleicher Dicke die Schwindrissgefahr

Abb. 10.9 Auftragen von Sanierputz auf die vorbereitete Wand



sehr groß. Der Porengrundputz muss selbstverständlich aufgeraut werden, damit ein inniger Verbund mit dem auf ihn angetragenen Sanierputz entsteht. Nach WTA-Merkblatt sollte der Grundputz pro mm Putzdicke einen Tag aushärten. Zugleich verhindert der Porengrundputz mit seinem Mindestporenvolumen von 45 Vol.-%, dass in den frisch aufgebrachten Sanierputz bereits Salze einwandern. Vielmehr sollen die Salze aus dem Mauerwerk vorwiegend im Porenraum des Grundputzes gespeichert werden (Maier 1993).

Der Auftrag von Sanierputz geschieht entweder von Hand oder maschinell. Werden übliche Putzmaschinen eingesetzt, so müssen diese mit Zusatzausrüstungen wie Nachmischer oder spezielle Schneckenmäntel ausgerüstet sein, um die nach dem WTA-Merkblatt 2-2-91/D(1991) geforderten Porengehalte des Putzes auch auf der Baustelle zu erreichen. Sicherheitshalber sollte immer vor dem ersten Aufbringen des Mörtels auf die Wand an der Düse Frischmörtel entnommen werden, dessen Rohdichte ermittelt wird. Über die Rohdichte des Frischmörtels ist ein Rückschluss auf ausreichenden Luftporengehalt möglich. Von Zeit zu Zeit sollte die Rohdichtemessung wiederholt werden. Da der Sanierputzmörtel auf Zementbasis hergestellt wird, ist das richtige Mischen und damit der richtige Luftporengehalt für den fertigen Sanierputz ausschlaggebend. Wird dies nicht beachtet, kann sich der Sanierputz in einen normalen Zementputz verwandeln, der infolge seiner Starrheit und seiner großen Dichte selbstverständlich keine bauschädlichen Salze aufnehmen kann und infolgedessen schon bald durch den Kristallisierungsdruck zerstört wird. (Abb. 10.9, Tab. 10.2)

Der Sanierputz wird entweder einlagig oder zweilagig ganz nach Herstellervorschrift aufgebracht. Die einzelne Lage sollte nicht dicker als 15 mm sein. Wird Sanierputz zu dick aufgetragen, reißt er und steht dann oftmals als selbstständige Schale vor dem Mauerwerk (Maier 1993).

Sanierputz wird sehr häufig an der Außenwand im Sockelbereich eingesetzt, da die Salzschäden dort am häufigsten auftreten. Dabei muss genau beachtet werden, dass Sanierputze wirklich nur oberhalb des Geländes bzw. Oberkante des Gehwegs

Tab. 10.2 Eigenschaften von Sanierputz/WTA

Eigenschaft	Maßeinheit	Prüfung nach	Anforderung
<i>Frischmörtel</i>			
Konsistenz	(cm)	5.2.1	$17,0 \pm 0,5^a$
Rohdichte ρ	(kg/dm ³)	5.2.2	keine
Luftporengehalt	(V-%)	5.2.3	≥ 25
Wasserrückhaltevermögen	(%)	5.2.4	≥ 85
Verarbeitbarkeit	(cm)	5.2.5	$\geq 3^b$
<i>Festmörtel</i>			
Rohdichte ρ	(kg/dm ³)	5.3.1	$\leq 1,4$
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ	–	5.3.2	≤ 12
Biegezugfestigkeit β_{bz}	(N/mm ²)	5.3.3	–
Druckfestigkeit β_d	(N/mm ²)	5.3.4	$1,5 - 5$
Festigkeitsverhältnis β_d/β_{bz}	–	5.3.5	≤ 3
Kapillare Wasseraufnahme W 24	(kg/m ²)	5.3.6	$\geq 0,3$
Wassereindringtiefe h	(Mm)	5.3.7	≤ 5
Porosität	(V-%)	5.3.8	≥ 40
Salzresistenz	–	5.3.9	bestanden

^a Richtwert für Ausbreitmaß, Herstellerangabe maßgebend

^b Nach 15 min Lagerdauer darf das Ausbreitmaß höchstens 3 cm abnehmen

Abb. 10.10 Der mit Sanierputz versehene Keller ist jetzt als Bürraum nutzbar



eingesetzt werden. Es kann daher sehr sinnvoll sein, einen Trennschnitt zwischen Gehweg und Sanierputz anzulegen. Der Einbau einer Noppenfolie ist obendrein sehr ratsam. Im Spritzwasserbereich des Sockels sollte der Sanierputz außerdem zweifach wasserabweisend grundiert werden, bevor eine farbige Beschichtung aufgetragen wird.

Richtig eingesetzt haben sich Sanierputzsysteme seit über 20 Jahren sehr bewährt und sind gerade aus der Altbausanierung heute nicht mehr wegzudenken. Da solche Putze etwa das Dreifache eines normalen Innenputzes kosten, will ihr Einsatz wohl bedacht sein (Abb. 10.10).

Abb. 10.11 Oberhalb der Sockelleiste hat Tauwasser Farbe und Putz geschädigt



10.3 Wärmedämmende Maßnahmen

10.3.1 Schäden durch Kondensat

Wegen der Gefahr der Kondenswasserbildung an und in den Außenwänden und der damit verbundenen Schimmelpilzbildung liegt es im Interesse eines jeden Bauherrn, die oftmals wesentlich zu dünnen Außenwände in seinem zu sanierendem Haus möglichst warm zu halten. Dies vermag er am besten mit Hilfe einer Wärmedämmung der Außenwand, entweder mit einem Wärmedämmputz oder einem Wärmedämmverbundsystem WDVS. Treten dabei Fehler auf und entstehen Wärmebrücken, stellt sich besonders rasch eine Unterschreitung des Taupunktes in den Außenwänden ein, der Bauschaden wird schnell gravierend. Andererseits besitzen besonders schwere Mauerwerke, wie z. B. die massiven Naturstein- oder Backsteinaußenwänden in Kirchen oder Schlössern, eine besonders große Speichermasse und damit ein besonders großes Temperatur-Beharrungsvermögen. Bei zyklischem Heizen in Verbindung mit einer Erhöhung der absoluten Raumluftfeuchte kann es sogar an solchen dicken Mauern zu Kondensation auf der Oberfläche führen. Günstig wäre es, wenn auch solche trügen Außenwände wärmegedämmt würden (Abb. 10.11).

10.3.2 Wärmedämmung

Historisches Mauerwerk nimmt als Bestandteil eines Gebäudes häufig Schaden durch Wasserzufuhr in Form von Kondensat bzw. Tauwasser (s. Kap. 4.2.2). Um Tauwasserausfall sowohl im Mauerwerk als auch an seiner inneren Oberfläche zu verhindern, wird man nicht umhin können, es durch eine geeignete Wärmedämmung vor dem Auskühlen zu bewahren. Diese Forderung an historisches Mauerwerk geht Hand in Hand mit dem Postulat der Energieeinsparverordnung

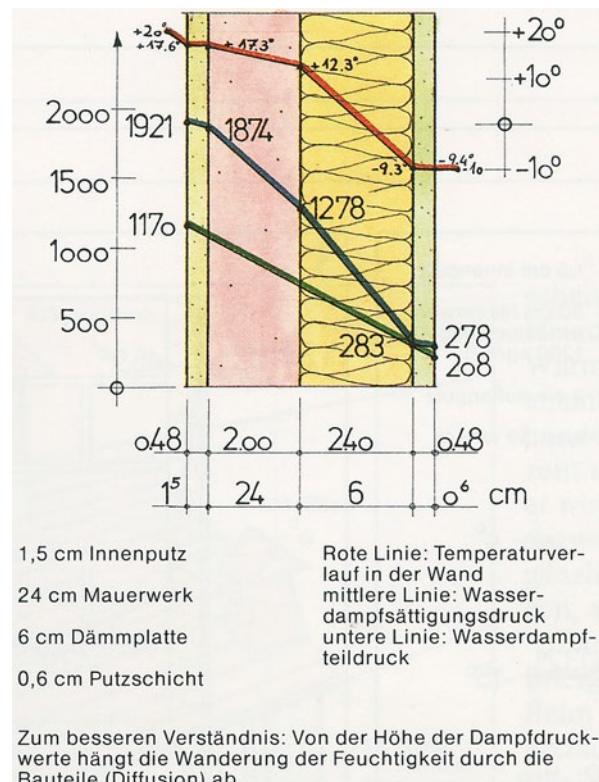
2009 – EnEV 2009 – (s. Tab. 6.7), wobei unter Denkmalschutz stehendes Mauerwerk diese Verordnungen selbstverständlich nicht befolgen muss. Nach EnEV 2009 sind Ausnahmen von den Anforderungen für Baudenkmale möglich, wenn die Substanz oder das Erscheinungsbild des Mauerwerks beeinträchtigt werden könnten oder unverhältnismäßig hoher Aufwand entstehen würde (Maier 2011). Aber immer dort, wo denkmalpflegerische Grundsätze nicht verletzt werden, ist das Einhalten der EnEV 2009 dringend zu empfehlen. Wenigstens die Dämmwerte der bauaufsichtlich eingeführten DIN 4108 *Wärmeschutz im Hochbau* sollten auch am historischen Mauerwerk eingehalten werden. Doch grundsätzlich gilt Bestandschutz für eine Konstruktion, die ja wesentlich älter ist als alle die bauaufsichtlich eingeführten Normen und Verordnungen unserer Tage.

Historisches Mauerwerk ist im allgemeinen wesentlich dicker als modernes. Diese Tatsache verführt auch Fachleute zu der irriegen Ansicht, dass es deshalb besser wärmedämmmt. Die dicken Mauern zeigen jedoch ein sehr trüges Aufheizverhalten und bleiben infolgedessen in der Aufheizphase noch lange kalt, auch wenn die es umgebende Raumluft bereits genügend warm geworden ist. In dieser Phase kann Tauwasser an der Wandoberfläche in gefährlicher Menge ausfallen. Erst wenn das Mauerwerk aufgeheizt ist, wird es durch sein sehr großes Wärmespeichervermögen für ein behagliches Raumklima sorgen (Maier 2011).

Das äußerlich so dick erscheinende, historische Mauerwerk ist innen oft stark zerklüftet und weist viele und durchaus große Hohlräume in seinem Inneren auf (s. Kap. 7.2.4). In der Praxis wird man außerdem immer wieder auf Versorgungs- oder Heizleitungen treffen, die in durchgehenden, hohlen, ungedämmten Mauerschlitzten liegen. Das Mauerwerk ist also an solchen Stellen stark geschwächt. Bei der Taupunktberechnung nach „Glaser“ wird jedoch selbstverständlich von einem homogenen Mauerwerk ausgegangen. Im Übrigen handelt es sich beim „Glaser-Verfahren“ um ein eindimensionales Verfahren, bei dem Randeinflüsse – analog den Wärmebrücken – nicht berücksichtigt werden. Daher können die errechneten wärmedämmenden Eigenschaften nach der jeweiligen Bauteildicke zu großen Trugbildern führen und mit der Wirklichkeit überhaupt nicht übereinstimmen. Außerdem kann es dazu kommen, dass der Tauwasserausfall innerhalb des Mauerwerksquerschnitts in den Hohlräumen stattfindet. Die Mauer wird dann durchnässt, ohne dass dies zunächst von außen zu erkennen ist. Wenn erst außen Ausblühungen zu sehen sind, dann ist der Schaden bereits angerichtet (Künzel 2007, Abb. 10.12).

Um überhaupt eine zuverlässige Aussage über die Möglichkeiten der Verbesserung des Wärmedämmverhaltens treffen zu können, bedarf es neben der Untersuchung des Mauerwerks selbst auch die des baulichen Gefüges, in dem es als integrierender Bestandteil eingeordnet ist. Wenn es außen keinen Architekturdekor wie Gesimse, Fensterumrahmungen sowie -verdachungen oder Wandmalereien trägt, ist auch aus denkmalpflegerischer Sicht eine äußere, bauphysikalisch unbedenklichere Wärmedämmung zulässig. Sie muss aber berücksichtigen, dass Außenmauern eines historischen Gebäudes nach oben hin Stockwerk für Stockwerk in ihrer Dicke abnehmen. Deshalb muss für die Bestimmung der Schichtdicke eines Wärmedämmputzes oder eines Wärmedämmverbundsystems – WDVS – immer die dünnste Mauerwerksparte zugrunde gelegt werden.

Abb. 10.12 Diffusionsdiagramm nach „Glaser“



10.3.2.1 Praktische Beispiele für ein Wärmedämmverbundsystem WDVS

Schulhaus Ein Nürnberger Schulhaus aus den 30-er Jahren des 20. Jahrhunderts verdeutlicht als Beispiel aus der Baupraxis eine solche typische Situation: (Maier 2011).

- Außenwand, Erdgeschoss
Innen glatt und außen rau verputztes Backsteinmauerwerk, Dicke=64 cm, zwischen Stahlbetonpfeilern angeordnet.
- Außenwand, 1. Obergeschoss
Innen glatt und außen rau verputztes Backsteinmauerwerk, Dicke=60 cm, das durch eine Reihe ca. 20 cm tiefer, spitzbogiger Nischen zwischen den Stahlbetonpfeilern geschwächt wird.
- Außenwand, 2. – 4. Obergeschoss
Innen glatt und außen rau verputztes Mauerwerk, Dicke=40 cm, ebenfalls zwischen Stahlbetonpfeilern angeordnet.



Abb. 10.13 Mit einem WDVS aus Styropor versehene Schulhausfront

Rechnerisch ergäbe sich für dieses Mauerwerk ein Wärmedurchgangskoeffizient U im Vergleich mit U_{\max} für ein Nichtwohngebäude nach Tab. 6.7:

im Erdgeschoss ein U-Wert = 0,76 W/(m² K) \geq 0,35 EnEV 2009

im 1. Obergeschoss wegen der Nischen ein U-Wert = 1,11 W/(m² K) \geq 0,35 EnEV 2009

im 2.–4. Obergeschoss ebenfalls nur ein U-Wert = 1,11 W/(m² K) \geq 0,35 EnEV 2009

Die Untersuchung der Außenwand hat ergeben, dass die Werte wahrscheinlich noch wesentlich schlechter angesetzt werden müssen, weil sowohl die Wasser- und Abwasserleitungen als auch die Heizungsrohre, alle aus verzinktem Stahl, in voller Wandhöhe innerhalb durchlaufender Mauerschlitzte geführt sind. Auf eine Dämmung wurde damals verzichtet. Alle diese Schlitze im Rahmen der Instandsetzungsmaßnahme zu öffnen und mit Wärmedämmung auszufüllen, wurde trotz mahnender Hinweise des Verfassers aus Kostengründen nicht durchgeführt. Um die Wand wärmetechnisch richtig auszustatten, war ein WDVS mit wenigstens 60 mm dicken Polystyrolhartschaumplatten zu errichten (Abb. 10.13).

Jetzt ergab sich rechnerisch für

die Erdgeschosswand ein U-Wert = 0,33 W/(m² K) \leq 0,35 EnEV 2009

und für die Obergeschosswände ein U-Wert = 0,39 W/(m² K) \geq 0,35 EnEV 2009

Zugleich damit war sicher gestellt, dass das Mauerwerk keine Probleme mehr mit ausfallendem Tauwasser bekommen konnte. Der von der EnEV 2009 vorgesehe-



Abb. 10.14 Die Obergeschosse des Mehrfamilienhauses vor der Instandsetzung

nen Höchstwert für Außenwände mit Zusatzdämmung von Nichtwohngebäuden mit einem $U_{\max} = 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ wäre bei den Obergeschosswänden allerdings leicht überschritten.

Denkmalgeschütztes Mehrfamilienwohnhaus Ein zweites Beispiel aus der Baupraxis zeigt den besonderen Anspruch der Denkmalpflege:

Ein Mehrfamilienhaus aus der Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert befindet sich in einer durchgehend bebauten Straßenzeile in Leipzig. Die Untersuchungen haben folgende Kennwerte erbracht (Abb. 10.14):

- Außenwand zur Straße, Erdgeschoss
Es handelt sich um innen und außen verputztes Backsteinmauerwerk mit Salzschäden im Sockelbereich. Der Außenputz imitiert ein Quadermauerwerk.
Mauerdicke = 59 cm U-Wert = 0,81 W/(m² K) ≥ 0,24 EnEV 2009
- Außenwand zur Straße 1. und 2. Obergeschoss
Wiederum innen und außen verputztes Backsteinmauerwerk, jetzt glatter Oberputz. Auf Deckenhöhe läuft außen ein Sandsteingesims waagerecht durch. Die Fenster sind von Sandsteingewänden umgeben, die obenauf jeweils gerade Verdachungen aus Sandstein tragen.
Mauerdicke = 54 cm U-Wert = 0,87 W/(m² K) ≥ 0,24 EnEV 2009
- Außenwand zur Straße 3. Obergeschoss
Sonst wie die anderen Geschosse gestaltet,
Mauerdicke = 35 cm U-Wert = 1,22 W/(m² K) ≥ 0,24 EnEV 2009
- Außenwand zum Hof, Erdgeschoss
Backsteinmauerwerk innen und außen verputzt,

Abb. 10.15 Hoffassade nach Aufbringen einer WDVS



Mauerdicke=59 cm U-Wert=0,81 W/(m² K)≥0,24 EnEV 2009

- Außenwand zum Hof, 1. und 2. Obergeschoss
Backsteinmauerwerk, innen und außen verputzt,
Mauerdicke=44 cm U-Wert=1,03 W/(m² K)≥0,24 EnEV 2009
- Außenwand zum Hof, 3. Obergeschoss
Backsteinmauerwerk, innen und außen verputzt,
Mauerdicke=35 cm U-Wert=1,22 W/(m² K)≥0,24 EnEV 2009

Am Erdgeschossaußenputz der Hofseite befanden sich großflächige Salz- und Feuchteschäden, in den Wohnräumen des 3. Obergeschosses überall starker Schimmelbefall an den Wänden.

Die Energiekennzahl für das gesamte Gebäude wurde mit 8 ermittelt. Die Energiekennzahl ist der gebräuchlichste Vergleichswert, um die thermische Qualität der Gebäudehülle zu beschreiben. Sie bringt zum Ausdruck, wieviel Energie pro Quadratmeter Fläche im Jahr benötigt werden und wird in kWh/(m² a) angegeben. Diese Kennzahl kann leicht in Euro/m² umgerechnet werden, weil man den Preis einer kWh kennt. Um diese Zahl auf 3 und damit den Heizölbedarf um die Hälfte auf 9,1 L/m² im Jahr zu reduzieren, wurden folgende Wärmedämmmaßnahmen festgelegt: An der Außenwand zum Hof sollte die erforderliche Dicke des WDVS mit 8 cm starken Mineralwolleplatten der Wärmeleitgruppe 040 aufgebracht werden (Abb. 10.15).

Abb. 10.16 Erlangen, Geudersches Schlösschen. Ansicht von Süden vor der Sanierung



Aus denkmalpflegerischen Gründen musste an der Straßenseite auf die eigentlich erforderliche WDVS in gleicher Dicke verzichtet werden, denn sonst wären die Umrahmungen, Verdachungen und Gesimse – wegen dieses Dekors war schließlich das Wohnhaus unter Denkmalschutz gestellt worden – in der Wärmedämmsschicht weitgehend verschwunden.

Landschlösschen (Geudersches Schlösschen) Bei der Instandsetzung eines Landschlösschens mit zwei Geschossen und einem ausbaubaren steilen Dach aus dem 17. Jahrhundert in Erlangen/Bruck sah sich der Verfasser vor die Aufgabe gestellt, eine ausreichende Wärmedämmung an den alten Außenwänden anzubringen (Maier 2011, Abb. 10.16).

Bereits 1477 soll es in Erlangen/Bruck eine als Steinhaus überlieferte Liegenschaft gegeben haben, die in der frühen Neuzeit als Reichslehen an das Nürnberger Patriziergeschlecht der Geuder von Heroldsberg gefallen ist. Es handelte sich um ein zweistöckiges, nur im rückwärtigen Bereich teilweise unterkellertes Wohnhaus mit einem 50 Grad steilen Satteldach mit Dachgauben, das 1904 und noch einmal 1934 stark verändert wurde. Die Südseite wurde im Erdgeschoss mit Backsteinen anstelle des Fachwerks verstärkt, im Obergeschoss und an der gesamten Nordseite blieb das Fachwerk erhalten. Im Osten wurden noch zusätzliche Garagen angebaut. Auf dem Grundstück verblieben zudem noch mehrere Nebengebäude (Abb. 10.17).

Um das Schlossgebäude energetisch wirkungsvoll zu sanieren, erarbeitete der Verfasser Lösungen für die Wärmedämmung der verschiedenen Außenwände und des auszubauenden Daches gemäß der damals geltenden EnEV 2007, wohl wissend, dass bei einem Baudenkmal wie diesem der § 24 (1) *Ausnahmen* zur Anwendung gelangen kann. Dort heißt es:

Soweit bei Baudenkälern oder sonstiger besonders erhaltenswerter Bausubstanz die Erfüllung der Anforderungen dieser Verordnung die Substanz oder das Erscheinungsbild beeinträchtigen oder andere Maßnahmen zu einem unverhältnismäßig hohen Aufwand führen, kann von den Anforderungen dieser Verordnung abgewichen werden.

Abb. 10.17 Erlangen, Geudersches Schlösschen. Ansicht von Osten. Vor dem Fachwerkgiebel befinden sich Garagen



Es galt, zunächst eine Lösung für die Südwand zu finden. Diese bestand im Erdgeschoss aus 40 cm dicken, beidseitig mit einem bis zu 4 cm starken Kalkputz beschichteten Backsteinen, im Obergeschoss weitgehend aus 24 cm dickem, innen und außen verputztem Fachwerk. Auf der ganzen Südwand sollte ein WDVS aufgebracht werden.

Vorüberlegung zur Anbringung eines Wärmedämmverbundsystems WDVS:

Um eine zweckgünstige Wärmedämmung für die Außenwände dieses Baukörpers festlegen zu können, mussten erst einige Vorüberlegungen erwogen werden:

- Durch eine moderne Nutzung wird ungleich mehr Wasser in ein Gebäude eingetragen als je zuvor. Dies geschieht u. a. durch die modernen Bäder, die Küchen und außerdem durch das Gießen der Blumen und Pflanzen im Haus. Dazu kommt, dass die vorgesehenen neuen, dichten Fenster im Gebäude den Luftaustausch verhindern und daher ein besonderes Lüftungsverhalten der Bewohner erfordern, um die wasser dampfgesättigte Luft gegen Frischluft auszutauschen. Die kritische Raumluftfeuchte in den Wohnungen kann daher bis zu $\geq 80\%$ betragen. Wenn an der inneren Mauerwerksoberfläche auch nur eine verhältnismäßig geringe Absenkung der Temperatur erfolgen würde, muss es zwangsläufig zu Kondensatausfall an ihr kommen.
- Das alte Mauerwerk dieses Schlosschens ist stellenweise wesentlich dicker als modernes, nämlich 48 cm. Die dicken Mauern zeigen ein sehr trüges Aufheizverhalten und bleiben infolgedessen in der Aufheizphase noch lange kalt, auch wenn die sie umgebende Raumluft bereits genügend warm geworden ist. In dieser Phase kann Tauwasser an der Wandoberfläche in gefährlicher Menge ausfallen und es zu Schimmelbildung kommen. Schimmelpilz wächst bereits bei 80 % relativer Luftfeuchte und $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ Raumlufttemperatur, wenn die schimmelpilzkritische Temperatur $\Theta < 12,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ an der Oberfläche einer Außenwand im Innenbereich erreicht wird (Künzel 2006).

Tab. 10.3 Wärmedurchgangskoeffizient der Außenwand

Außenwand: Einschaliges Mauerwerk aus Backsteinen, 48 cm dick, Rohdichte 1.800 kg/m³
 Baustoff: Backsteine in Kalkmörtel, innen und außen mit Kalkputz

Schicht – Nr	Bezeichnung	Schichtdicke d in (m)	Wärmeleitfähigkeit λ in (W/(m K))	Wärmedurchlasswiderstand R in (m ² K/W)
	Wärmeübergang Rsi			0,13
1	Innenputz (Kalk)	0,015	0,87	0,01724
2	Backsteinmauerwerk	0,45	0,81	0,55555
3	Außenputz (Kalk)	0,015	0,87	0,01724
	Wärmeübergang Rsa			0,04
	Wärmedurchgangskoeffizient: U = 1/Σ R in W/(m ² K)			1,3157
	Wärmedurchgangskoeffizient der EnEV 2007: U = in W/(m ² K)			0,35

Der Tauwasseranfall sollte – wie eingangs gesagt – also nicht nach „Glaser“ sondern besser durch die hygrothermische Simulation mit WUFI® (Künzel et al. 2006) bestimmt werden. Das dafür ausgearbeitete WTA-Merkblatt 6–2–01/D (2001) *Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse* bildet die Ausgangsbasis für die DIN EN 15 026 vom Juli 2007 – *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation*. Erst wenn im Winter das ganze Mauerwerk aufgeheizt ist, wird es durch sein sehr großes Wärmespeichervermögen für ein behagliches Raumklima sorgen.

Die Berechnung ergab folgenden U-Wert für die südliche Außenwand (Tab.10.3):

Der U-Wert der Außenwand entsprach nicht den Anforderungen der damals gültigen Energieeinsparverordnung EnEV 2007. Bei einer geforderten Wärmedämmung, insbesondere bei einer Innendämmung, muss geprüft werden, ob Tauwasser zwischen Dämmung und Außenwand entsteht (Künzel 2007). Deshalb wählte der Verfasser ein WDVS aus 8 cm dicken Mineralwolleplatten, WLG 035, mit mineralischem Edelputz beschichtet. Dies ergab einen U-Wert $\approx 0,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) \geq 0,35 \text{ EnEV 2007}$.

- Das äußerlich so dick erscheinende, alte Mauerwerk war hier wie in den meisten Fällen innen stark zerklüftet und wies viele, durchaus große Hohlräume in seinem Inneren auf. Außerdem traf man immer wieder auf Versorgungs- oder Heizleitungen, die in durchgehenden, hohlen, ungedämmten Maueraussparungen liegen. Das Mauerwerk war also an solchen Stellen stark geschwächt. Für die Taupunktberechnung nach „Glaser“ wird jedoch selbstverständlich von einer homogenen Wand ausgegangen. Daher konnte dieses Verfahren für die Fragestellungen bei der Instandsetzung dieses Schlösschens nicht angewendet werden. Die nach „Glaser“ errechneten wärmedämmenden Eigenschaften nach der jeweiligen Bauteildicke müssen mit der Wirklichkeit überhaupt nicht übereinstimmen. Außerdem kann es dazu kommen, dass der Tauwasserausfall innerhalb des Mauerwerksquerschnitts in den Hohlräumen stattfindet, denn diese stellen eine Wärmebrücke dar. Die Mauer wird dann durchnässt, ohne dass dies zunächst von außen zu erkennen ist. Wenn erst außen Ausblühungen zu sehen sind, ist der Schaden bereits eingetreten.

Abb. 10.18 Erlangen, Geudersches Schlösschen. Der Fachwerk-Ostgiebel wurde auch zur Überbrückung der Fugen und Spalten mit einer WDVS aus Mineralwolle versehen



- Um überhaupt eine zuverlässige Aussage über die Möglichkeiten der Verbesserung des Wärmedämmverhaltens treffen zu können, bedarf es neben der Untersuchung des Mauerwerks selbst auch der des baulichen Gefüges, in dem es als integrierender Bestandteil eingeordnet ist. Da seine Wand außen keinen Architekturdekor trägt, war auch aus denkmalpflegerischer Sicht eine äußere, bauphysikalisch unbedenklichere Wärmedämmung zulässig. Die Planung musste aber wie bei allen Außenwänden eines historischen Gebäudes berücksichtigen, dass die Wände nach oben hin Stockwerk für Stockwerk in ihrer Dicke abnehmen. Deshalb muss zur Berechnung des U-Wertes und des Taupunkts – wie bereits gesagt – stets der geringste Mauerquerschnitt oder der schlechteste λ -Wert des Bauteils Mauerwerk zugrunde gelegt werden. Selbstverständlich muss außerdem für die Bestimmung der Schichtdicke eines das Gebäude einhüllenden Wärmedämmverbundsystems WDVS immer die dünnste Wand zugrunde gelegt werden.
- Ein zweiter wichtiger Effekt kann durch ein WDVS erreicht werden: Alte Mauern weisen meistens Risse an ihrer Oberfläche auf. Diese sind immer dann problematisch zu sanieren, wenn sie noch dynamisch, also beweglich sind. Hier lässt sich die Energieeinsparung mit der RissSANierung sinnvoll koppeln. Durch die 80 mm dicken, in Rissbereichen angedübelten, sonst aufgeklebten Dämmplatten erfolgt eine Entkoppelung von gerissenem Putz auf dem Mauerwerk und der neuen Oberschicht. Außerdem wird durch die Wärmedämmung auch die thermische Rissbewegung unterbunden, die Risse weiten sich also nicht mehr weiter auf. Dabei können alle bekannten Wärmedämmverbundsysteme mit mineralischen oder organischen Beschichtungen auf Polystyrolhartschaum-, Mineraldämm- oder Korkplatten eingesetzt werden. Wegen des Brandschutzes wurden an allen, mit einem WDVS gedämmten Außenwänden Mineraldämmplatten eingesetzt. Als Oberflächenbeschichtung wurde wegen seiner günstigen Wasserdampfdurchlässigkeit ein mineralischer Edelputz P II nach DIN 18 550 Putz; Putze aus Mörteln mit mineralischen Bindemitteln, Ausführung – oder CS II nach DIN EN 998–1 Putzmörtel; Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau – und als Anstrich eine Dispersions-Silikat-Farbe gewählt (Abb. 10.18).

Abb. 10.19 Erlangen, Geudersches Schlösschen. Auf einen eigens ausgebildeten Sockel wurde verzichtet. Er wurde nur farbig abgesetzt



- Anschlüsse

Bei der Sockelausbildung ist zu beachten, dass die üblichen Aluminium-Sockelschienen eine Wärmebrücke im Fußbodenbereich des Erdgeschosses bilden. Sie können einen Wärmeverlust an der Erdgeschoss-Innenwandoberfläche insbesondere entlang der Fußbodenkante verursachen, der die Innenwandoberflächentemperatur schnell über die für Schimmelpilze kritische absinken lässt. Als Abhilfe kam bei diesem Projekt nur eine über den Sockel bis zum Fundament hinuntergehende Perimeterdämmung in Betracht (Abb. 10.19).

Der Anschluss an die Traufe des stark geneigten Daches erforderte eine komplett neue Verkleidung aus Holz, die sich der nunmehr um 8 cm dickeren Wand anpasste. Auch die Fensterbänke mussten neu verblecht werden. Die Anschlüsse des WDVS an die Fensterlaibungen waren genau zu überlegen. Die Wärmedämmung musste in die Laibung hineingezogen werden, um eine Wärmebrücke zu vermeiden. Das konnte nur gelingen, wenn das Fensterstockholz breit genug ausgeführt wurde. Fensterbleche müssen die Dicke der WDVS ebenfalls berücksichtigen, sie dürfen also nicht direkt an das Mauerwerk der Laibung angepasst werden, sonst kann es Risse im Oberputz des WDVS geben (Abb. 10.20).

Die Straßenseite des Schlosschens, also die Westseite, besteht aus Sandsteinquadern. Hier wurde eine Innendämmung aus Kalzium-Silikat-Platten – diese werden weiter unten behandelt – erforderlich, denn die Sandsteinfassade steht unter Denkmalschutz. Der Anschluss der Außendämmung des WDVS, an die seitlichen Sandstein-Eckpfeiler des Gebäudes wurde derart gestaltet, dass das WDVS im letzten Meter zum Eckpfeiler hin allmählich an Dicke verlor und bündig mit ihm auslief. Die dadurch entstehende Wärmebrücke wurde durch eine entsprechende Innendämmung verhindert (Abb. 10.21).

Glatte Fassaden setzen dem WDVS die geringsten Schwierigkeiten entgegen. Allerdings müssen die Anschlussdetails sorgfältig geplant werden: die Sockelausbildung, die Anschlüsse der Wärmedämmung an die Laibung von Fenstern und Türen und der Anschluss an das Dach. Ohne einen richtig ausgebildeten Sockel

Abb. 10.20 Erlangen, Geudersches Schlösschen. Die neuen Fensterbänke des Ostgiebels wurden an das WDVS angepasst

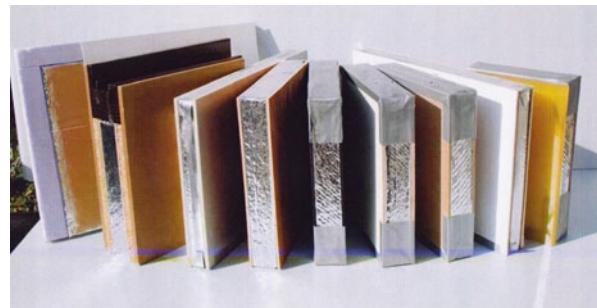


Abb. 10.21 Erlangen, Geudersches Schlösschen. Anschluss der Sandsteinfassade an die Wärmedämmung der Südseite



fehlt der Spritzwasserschutz, Feuchte kann aus dem das Gebäude umschließenden Erdreich kapillar eindringen und ihr Zerstörungswerk beginnen. Insbesondere sind vor dem Eingang liegende Treppenpodeste und Kellerzugänge problematisch. Die Laibungen von Fenstern und Türen müssen in jedem Fall ausreichend von Wär-

Abb. 10.22 Auf dem Markt sind bereits verschiedene VIP – Elemente. Hier wird die VIP/Qasa Elementfamilie der Fa. Variotec gezeigt



medämmung umhüllt sein. Um für den Auftrag wärmedämmenden Materials Platz zu schaffen, müssen die neuen Fenster kleiner dimensioniert werden als die alten. Auch die äußeren Fensterbretter haben sich den neuen Fensterformaten anzupassen. Hier werden häufig Fehler gemacht, die sich dann als schmutzige Wassernasen auf beiden Seiten jedes Fensterbretts bzw. als Putzrisse zeigen. Auch der Überstand der alten Fensterbänke über die neue Dicke der Wärmedämmung ist zumeist nicht mehr ausreichend, um das Regenwasser sicher abtropfen zu lassen. Der Anschluss an das Dach kann den Dachüberstand derart verkürzen, dass die Architektur des Gebäudes entstellt wird. Das gilt vor allem für die Giebel, deren Ortgang nicht weit genug übersteht. Daher kann es erforderlich werden, dass ein gänzlich neuer Dachüberstand geschaffen werden muss.

Die meisten Planer eines WDVS denken nicht daran, dass bei Grenzbebauung das WDVS ein nachbarrechtliches Problem darstellt. Die wärmedämmende Konstruktion ragt in das Nachbargrundstück hinein, sie vergrößert das Gebäude über seine Baugrenzen hinaus. Das Überschreiten der Baugrenzen muss bauaufsichtlich genehmigt werden. Wenn der Nachbar eine Entschädigung für die Grenzüberschreitung bzw. einen Kaufpreis für den in Anspruch genommenen Landstreifen verlangt, kann dies die Maßnahme unerwartet verteuern.

Um dies zu verhindern, ist zu überlegen, ob hier die 20 mm dünnen Vacuum-Isolations-Paneele VIP oder die Vacuum-Insulating-Sandwiches VIS als Außenwanddämmung eingesetzt werden können. Sie besitzen eine wenigstens fünffach geringere Wärmeleitfähigkeit λ als herkömmliche Dämmstoffe wie Mineralwolle oder Styropor. Sie sind zwar mit manchen Aspekten noch immer in der Erprobungsphase, können aber an Außenwänden durchaus erfolgreich eingesetzt werden (Abb. 10.22).

10.3.2.2 Innendämmung

Immer dann, wenn eine Außendämmung technisch schwer machbar erscheint, sollte man zu Lösungen mit zusätzlichen Dämmschichten innerhalb der Räume des Gebäudes greifen. Dies trifft insbesondere bei Fachwerkhäusern und unter Denkmalschutz stehenden Gebäuden zu. Da man Fachwerkwände außen auch heute noch sehr gerne freilegt, widerspricht dem selbstverständlich eine Einhüllung mit einem WDVS. Auch die mit reichem Dekor verzierten Fassaden der Baudenkmäler setzen

der Außendämmung sehr enge, deutliche Grenzen. Für solche Bauten hat sich die raumweise Innendämmung durchaus bewährt.

Vielen Planern und Handwerkern gilt das Anbringen von Außenwanddämmung an der Innenseite als äußerst riskante Sanierungsmaßnahme. (Borsch-Laaks 2007)

Dabei muss der Planer und der ausführende Handwerksbetrieb in der Hauptsache folgende Normen beachten: DIN EN 13 829 – Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Luftdurchlässigkeit von Gebäuden, DIN EN ISO 13 788 – Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren und die DIN EN ISO 10 211–Teil 1 und 2 – Wärmebrücken im Hochbau sowie DIN 4108–3– Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden.

Innendämmungen verhalten sich feuchtetechnisch weit unproblematischer als die „Glaser“-Berechnungen befürchten lassen. Der Hauptgrund dafür ist, dass kapillar leitfähige Putze und Baustoffe des Mauerwerks eine eventuelle lokale Erhöhung der Feuchte hin zu verdunstungsfähigen Oberflächen verteilen. Die Ergebnisse von Berechnungen nach „Glaser“ und der hieraus motivierte Einbau von Dampfsperren liegen nicht – wie gemeinhin geglaubt wird – auf der sicheren Seite, wenn in der Konstruktion der Innendämmung „außerplanmäßige Befeuchtungen“, die nicht aus der Dampfdiffusion stammen, zu befürchten sind (Künzel 2007).

Für Fälle mit dem Risiko „Schlagregen und Dampfkonvektion“ – es handelt sich dabei in der Hauptsache um Fachwerkwände – muss man die Austrocknungspotenziale vor allem durch Einsatz feuchtevariabler oder feuchteadaptiver Dampfbremsen und kapillaraktiver Dämmstoffe nach innen hin erhöhen. Tauwasserbildung durch Luftströme hinter der Innendämmung muss jedenfalls immer vermieden werden. Denn Hinterströmungen können in der Konstruktion ein Risiko zur Schimmelbildung erzeugen und mit der Rückströmung die Raumluft mit giftigen Sporen und Stoffwechselprodukten der Mikroorganismen belasten. Dieses Risiko lässt sich durch geeignete konstruktive Maßnahmen ausschließen (Borsch-Laaks 2007).

Wendet man diese Überlegungen bei der Planung an, muss die Innendämmung nicht immer mit einer dampfdichten Folie vor eindringender, feuchtwärmer Luft geschützt werden. Wenn aber doch eine Folie eingebaut wird, muss sie dicht an die Umgebungswände anschließen, um eine Luftströmung infolge des Temperaturunterschieds zwischen innen und außen durch die Konstruktion hindurch zu verhindern. Eine solche Luftkonvektion wird vor allem Feuchte hinter die Wärmedämmung und schließlich in die Poren des Bauteils hinein transportieren. Dieser Vorgang muss zwangsläufig zu Schäden führen. Bei einer Hintermauerung der Außenwände mit Lehmsteinen oder Porenbetonsteinen ist eine solche Folie nicht erforderlich (Abb. 10.23).

Innendämmungen müssen sehr sorgfältig ausgeführt werden, denn bei Einbau einer dampfbremenden Folie kann die kleinste Perforation dieser Folie zu Schäden ungeahnten Ausmaßes führen. Außerdem sind auch hier wieder die Anschlussdetails ausschlaggebend für eine Ausführung frei von Schäden.

Abb. 10.23 Eine mit Mineralwolle innen gedämmte Außenwand



Für die Innendämmung gilt:

so diffusionsdicht wie möglich,
um Tauwasser aus normaler Diffusion zu minimieren
und
so diffusionsoffen wie möglich,
um die Austrocknung von Feuchte infolge von
Schlagregen zu unterstützen.

Der Westgiebel des Geuderschen Schlösschens mit seinem Erker besteht aus einem 40 cm starken, nur innen 2,0 cm dick verputzten Sandsteinmauerwerk. Der Giebel musste selbstverständlich original erhalten werden. Um einen der EnEV 2007 angenäherten U-Wert zu erreichen, setzte der Verfasser eine Innendämmung aus Kalzium-Silikat-Platten, sog. „*Klimaplatten*“ ein. Der alte Innenputz blieb erhalten (Abb. 10.24).

Da es sich um den Westgiebel handelt, der in besonderem Maße von Schlagregen betroffen ist, muss die innen liegende Wärmedämmung sehr genau bedacht werden. Um dem in den Sandstein tief eingedrungenen Regenwasser eine raschere Verdunstung zu ermöglichen, sollten innenseitig nur variabel dampfbremsende Schichten angeordnet werden.

Abb. 10.24 Innen mit Klimaplatten gedämmter Erker



Abb. 10.25 Der Westgiebel, aus Sandsteinquadern gemauert



Die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten für den Westgiebel ergab (Abb. 10.25, Tab. 10.4):

Durch eine Innendämmung lässt sich der von der EnEV 2007 oder der von der EnEV 2009 geforderte U_{\max} von $0,35 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ für die allgemeine Wärmedämmung von Außenwänden bei Altbauten in der Praxis mit diffusionsoffenen Baustoffen nur schwer erreichen, da die Dämmdicken auf der Innenwand 100 mm oder mehr betragen müssten. Erreichbar sind bei einer Dämmdicke von 60 mm U-Werte von $0,7\text{--}0,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Die Berechnung ergab in unserem Fall einen U -Wert = $0,76 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Hier kommt die zusätzliche Erleichterung der Anlage 3 Absatz 1 d der EnEV 2009 zum Tragen. Bei innenraumseitigen Dämmschichten gelten die Anforderungen in Verbindung mit der Schlagregenbeanspruchungsgruppe 1 als erfüllt, wenn der Wärmedurchgangskoeffizient des Wandaufbaus $0,84 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ nicht überschreitet, was hier der Fall war (Abb. 10.26).

Eine Dampfbremse ist für den gewählten Aufbau der Dämmung innen nach DIN 4108-3 nicht gefordert, da der sd – Wert von Innendämmung + Innenputz am

Tab. 10.4 Wärmedurchgangskoeffizient des Westgiebels

Außenwand: Mauerwerk aus Sandsteinen, 40 cm stark, Rohdichte 2.600 kg/m³

innen originaler Kalkputz, ca. 2,5 cm dick

innen Kalzium-Silikat-Platten, 6 cm dick, Rohdichte ca. 300 kg/m³

innen mit Gipsputz beschichtet

Schicht – Nr	Bezeichnung	Schichtdicke d in (m)	Wärmeleitfähigkeit λ in (W/(m K))	Wärmedurchlasswiderstand R in (m ² K/W)
Wärmeübergang Rsi				0,13
1	Innenputz (Gips)	0,015	0,70	0,02142
2	Kalzium-Silikat-Platten	0,06	ca. 0,065	0,92307
3	alter Innenputz (Kalk)	0,025	0,87	0,02873
4	Sandsteinmauerwerk	0,40	2,30	0,17391
Wärmeübergang Rsa				0,04
Wärmedurchgangskoeffizient: U=1/Σ R in W/(m ² K)				0,76
Wärmedurchgangskoeffizient der EnEV 2009: U= in W/(m ² K)				0,35

Abb. 10.26 Der enge Erker im Westgiebel wurde mit einer Innendämmung aus 60 mm starken Kalzium-Silikat-Platten versehen



Westgiebel ca. 0,5 m beträgt. Diese Konstruktion kann also nachweisfrei bleiben, obwohl die Anbringung einer Innendämmung immer dazu führt, dass die außerhalb der Innendämmung liegenden Bauteilschichten kälter werden. Besonders im Winter könnte es dadurch am Übergang der Innendämmung zur Außenwand zu einer Unterschreitung der Taupunkttemperatur und infolgedessen zu Schimmelpilzbildung kommen, falls keine Austrocknung mehr erfolgen kann. Wissenschaftliche Studien hierzu haben gezeigt, dass dies beim Einsatz von Kalzium-Silikat-Platten wegen ihrer hohen Saugfähigkeit nicht zu befürchten ist. Es zeigte sich dabei u. a., dass das Berechnungsverfahren nach „Glaser“ bei solchen kapillaraktiven Dämmungen nicht einfach übernommen werden darf, weil diese größere Tauwassermengen durchaus ausgleichen können. Wie oben ausgeführt, sollen für Fälle mit den Risiken „Schlagregen und Dampfkonvektion“ die Austrocknungspotenziale vor allem durch kapillaraktive Dämmstoffe, wie beispielsweise Kalzium-Silikat-Platten oder Lehmsteine, nach innen hin erhöht werden.

Tab. 10.5 Wärmeleitfähigkeit verschiedener Putze

Putze	λ_R in W/(m K)
aus reinem Zement	1,40
aus Kalk, Kalkzement und hydraulischem Kalk	0,87
aus Gips, Kalkgips, Anhydrit und Kalkanhydrit	0,70
aus Leichtputz mit $\rho \leq 1.300$	0,52
aus Leichtputz mit $\rho \leq 1.000$	0,36
aus Leichtputz mit $\rho \leq 700$	0,21
aus Gipsputz ohne Zuschlagstoffe mit $\rho \leq 1.200$	0,35
Wärmedämmputz nach DIN 18 550-3 je nach Wärmeleitfähigkeitsgruppe WLG	
WLG 0,60	0,060
WLG 0,70	0,070
WLG 0,80	0,080
WLG 0,90	0,090
WLG 1,00	0,100

10.3.2.3 Wärmedämmputz

In vielen Fällen muss bei der Mauerwerkssanierung die Wärmedämmung von außen verbessert werden. Dies kann entweder durch ein Wärmedämmverbundsystem WDVS oder durch einen Wärmedämmputz geschehen. Wärmedämmputze können darüber hinaus auch im Rahmen eines Rissinstandsetzungs-Systems ähnlich dem WDVS eingesetzt werden. Besonders labile Putzbeschichtungen von Mauerwerk können durch Wärmedämmputze in eine dauerhafte, rissefreie Putzoberfläche verwandelt werden.

Je niedriger bzw. schlechter die Wärmeleitfähigkeit eines Putzes ist, desto höher ist sein Wärmedämmvermögen. Während normaler Putz eine relativ gute Wärmeleitfähigkeit besitzt, lässt sich mit Hilfe von mineralisch gebundenen, wegen der Verwendung von sehr leichten Zuschlägen wie Blähton oder -schiefer, Bims, Perlite, Vermiculit und expandiertes Polystyrol, sehr leichten Wärmedämmputzen eine mehr als zehnfach höhere Wärmedämmung gegenüber normalen Putzen erzielen. Die Tab. 10.5 zeigt diese Unterschiede im Wärmedämmverhalten zwischen herkömmlichen Putzen und dem Wärmedämmputz auf.

Wärmedämmputzsysteme aus Mörteln mit mineralischen Bindemitteln und expandiertem Polystyrol (EPS) als Zuschlag sind in DIN 18 550-3 *Putz; Wärmedämmputzsysteme aus Mörteln mit mineralischen Bindemitteln und expandiertem Polystyrol (EPS) als Zuschlag* genormt. Sie bestehen aus einem wärmedämmenden Unterputz mit EPS als Leichtzuschlag und einem ein- oder zweischichtigen Oberputz. Unter- und Oberputz sind aus Werk trockenem Mörtel (WTM) nach DIN 18 557 *Werkmörtel; Herstellung Überwachung und Lieferung* herzustellen. Hinsichtlich des Brandschutzes werden diese Wärmedämmputzsysteme in die Baustoffklasse B1 (schwer entflammbar nach DIN 4102-1 *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen*) eingestuft. Außerdem gibt es nicht genormte Systeme mit bauaufsichtlicher Zulassung, die der Baustoffklasse A1 (nicht brennbar) zugeordnet werden.

Abb. 10.27 Vorbereitung des Putzgrundes für den Auftrag von Wärmedämmputz im Fensterbankbereich



Ein Beispiel: Eine schlecht gedämmte Außenwand, bestehend aus 24 cm Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit $\lambda_R = 0,79 \text{ W}/(\text{m K})$, mit einem U – Wert von $2,13 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ hat bei einer Außenlufttemperatur von -10°C und einer Raumlufttemperatur von $+20^\circ\text{C}$ an der Wandinnenseite eine Temperatur von $11,7^\circ\text{C}$. Dies bedeutet, dass bereits bei einer relativen Luftfeuchte von über 55 % an dieser Wand Tauwasser entsteht. Werden hier außen 50 mm Wärmedämmputz mit einem Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_R = 0,080 \text{ W}/\text{m K}$ aufgetragen, verbessert sich der U – Wert auf $0,91 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ und die Temperatur an der Außenwandinnenseite steigt auf $+16,4^\circ\text{C}$. Jetzt ist die Gefahr der Bildung von Tauwasser erst ab einer relativen Luftfeuchte von 80 % gegeben. Es empfiehlt sich wegen der Gefahr des Schwindens, den Wärmedämmputz nicht dicker als 100 mm aufzutragen. Um U_{\max} der EnEV 2009 = $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ zu erreichen, muss in diesem Fall besser zu einem WDVS gegriffen werden.

Bei Regen kann Wasser in Außenbauteile eindringen. Eine solche Durchfeuchtung von außen muss ebenso verhindert werden wie eine Kondensation im Inneren des Bauteils. Den Regenschutz für Wärmedämmputze übernimmt der Oberputz, der daher eine das Wasser abweisende, hydrophobe Wirkung haben muss. Gleichzeitig sollte er jedoch möglichst durchlässig für Wasserdampf bleiben, um eingedrungene Feuchtigkeit rasch wieder abgeben zu können bzw. um die Wasserdampfdiffusion von innen nicht zu stark zu behindern. Aus diesem Grunde sollte für jedes aus Wärmedämmputz und Oberputz bestehende Wärmedämmputz-System der Diffusionswiderstand sd insgesamt $\leq 2 \text{ m}$ sein.

Bei der Planung bzw. vor Arbeitsbeginn ist jedoch wegen der größeren Putzstärken darauf zu achten, dass Überstände wie z. B. Fensterbänke entsprechend breiter ausgebildet werden. Diese zu beachtende Anpassung an Wärmedämmputze gilt auch für Fallrohre, Abdeckungen u. Ä. Da Wärmedämmputze relativ weich und daher leicht mechanisch zu beschädigen sind, sollten an Ecken, Fensterlaibungen, Türen und oberhalb des Sockels Kantenprofile angebracht werden. Je nach Art und Festigkeit des Untergrundes ist ein Spritzwurf erforderlich, z. B. der Mörtelgruppe MG II bis III auf Mauerwerk (s. Abb. 10.8). Zuvor müssen grobe Unebenheiten und Löcher im Mauerwerk mit Leichtmörtel ausgefüllt werden (Abb. 10.27).

Nach ausreichender Erhärtung des Spritzwurfs wird der Wärmedämm-Unterputz aufgetragen. Dies kann mit der Putzmaschine, aber auch von Hand erfolgen. Die Dicke des Auftrags richtet sich u. a. nach dem Grad der gewünschten Wärmedämmung. In einem Arbeitsgang können zwischen 20 und 50 mm angeworfen werden. Bei größeren Dicken sind zwei Arbeitsgänge erforderlich, wobei der zweite Putzauftrag je nach Witterung spätestens am nächsten Tag erfolgen sollte. Der aufgetragene Putz wird beim Abziehen mit der Latte angedrückt und glatt gezogen, jedoch nicht verrieben oder gefilzt. Der Unterputz muss mindestens 20 mm und in der Regel höchstens 100 mm dick sein. Nach ausreichender Erhärtung des Wärmedämmputzes wird der Oberputz aufgetragen. Die Zeitspanne zwischen Fertigstellung des Unterputzes und Aufbringen des Oberputzes muss mindestens sieben Tage betragen, bzw. bei größeren Dicken mindestens ein Tag je 10 mm Unterputz. Diese Zeiten sind bei ungünstigen Witterungsbedingungen, etwa wenn die Luftfeuchte zu hoch oder die Temperatur zu niedrig ist, zu verlängern. Entsprechend den Anforderungen der nachfolgenden Putzlage ist die Oberfläche des Wärmedämmputzes bei Kratzputz aufzukämmen oder bei Ausgleichsputz für dünnlagige Oberputze aufzurauen. Der Oberputz wird mit einer geeigneten Maschine oder von Hand aufgetragen. Die mittlere Dicke des ein- oder mehrschichtigen Oberputzes muss im Mittel 10 mm betragen, jedoch mindestens 8 mm und höchstens 15 mm. Bei mehrschichtigem Oberputz muss die Ausgleichsschicht mindestens 6 mm dick sein.

Da Wärmedämmputze relativ weich sind, können sie zwar leicht mechanisch beschädigt werden, andererseits nehmen sie aber auch Spannungen aus dem Untergrund auf, ohne sie an den Oberputz weiterzugeben. Dennoch ist es ratsam, in den Oberputz bzw. in die Zwischenschicht ein vollflächiges Armierungsgewebe einzubetten.

10.4 Putze

Nach erfolgreicher Instandsetzung des Mauerwerks muss der meist gerissene und abgeplatzte, defekte Putz auf der Mauerwerksoberfläche bzw. auf der Gebäudefassade wieder in Ordnung gebracht werden (Maier 2007). Zunächst beurteilt und klassifiziert der Fachmann das Rissebild: Er kann Einzelrisse und einzelne Hohllagen des Putzes, aber auch ein die gesamte Fassade überziehendes Netz von Rissen feststellen. Die verschiedenen Ursachen von Rissen lassen sich auf folgende Ausgangspunkte zurückführen:

Risse können

- putzbedingt sein, lassen sich als sog. „*beruhigbare*“ Risse einstufen und treten dann ausschließlich in der Putzschale auf. Sie können bei mehrlagigen Putzen sowohl in einer einzigen als auch in allen Lagen vorhanden sein.
- putzgrundbedingt sein, lassen sich als sog. „*bedingt beruhigbare*“ Risse einstufen und sind durch Verformungen aus dem Putzgrund wie z. B. hygrisches oder thermisches Quellen und Schwinden entstanden.



Abb. 10.28 Sackrisse (links), Schrumpfrisse (rechts)

- bauwerksbedingt sein, lassen sich als sog. „nicht beruhigbare“ Risse einstufen und treten dann nicht nur im Putz, sondern auch im darunter befindlichen Mauerwerk auf; es handelt sich um dynamische Risse, die durch Setzungen und Bewegungen des Mauerwerks entstehen.

Putzrisse beurteilt man anhand ihres Verlaufes, ihrer Verteilung, ihrer Breite und Tiefe, ihres Versatzes parallel und senkrecht zur Bauteilloberfläche, ihres Alters und der künftig zu erwartenden Bewegung ihrer Flanken. Die Rissbreite kann mit einem rissbreiten Vergleichsmaßstab oder einer Lupe, die Riss Tiefe durch im Rissbereich entnommene Putzproben, das relative Rissalter durch den Verschmutzungsgrad der Rissflanken und die noch zu erwartenden Bewegungen können durch Gipsmarken oder einen Setzdehnungsmesser (s. Abb. 6.12) bestimmt werden. Außerdem ist der Untergrund zu überprüfen (Kap. 6 Mauerwerksdiagnostik). Der Fachmann zeichnet Verlauf und Verteilung der Risse in Bestandspläne ein, weil er in der Zusammenschau aller Putzrisse in der Lage ist, ihre Ursache am sichersten zu erkennen.

Folgende Rissarten treten in der Regel auf: (WTA-Merkblatt E-2-04-07/D 2007)

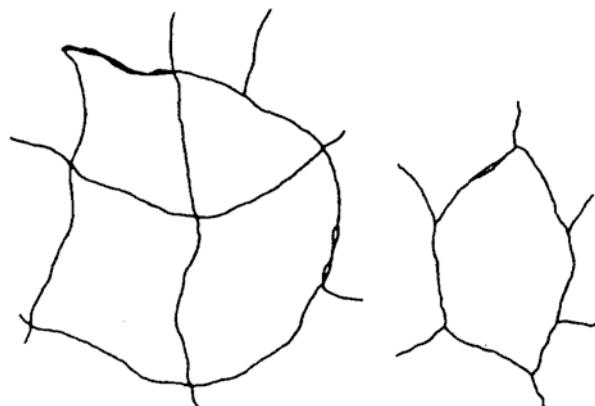
- **Sackrisse.**

Es handelt sich um putzbedingte, beruhigbare und überwiegend horizontal durchhängende Risse in einer Länge von 10 bis 20 cm und einer Breite bis zu 3 mm. Im Bereich der unteren Rissflanke sind durchaus Hohlstellen zu erwarten. Diese Risse entstehen bei zu dickem Putzauftrag, bei schlechter Haftung am Putzgrund, bei zu langem Verreiben, sog. „Totreiben“ der Putzoberfläche und schließlich bei zu weicher Konsistenz des Mörtels im noch plastischen, also noch nicht gehärteten Zustand.

- **Schrumpfrisse**

Es handelt sich um putzbedingte, beruhigbare und kurz nach dem Aufbringen durch zu schnelles Austrocknen entstehende, netzförmige Risse mit einem Knotenabstand von ca. 20 cm und Rissbreiten bis zu 0,5 mm. Sie reichen nur selten bis zum Putzgrund, wenn doch, kommt es nur dann nicht zu einer Beeinträchtigung des Putzes, wenn sich die Rissflanken nicht vom Mauerwerk lösen. Mit Schrumpfrissen muss besonders bei reinen Kalkputzen, wie sie in der Denkmalpflege oft gefordert werden, gerechnet werden. Sie können allerdings durch rechtzeitiges Nachbehandeln oder durch Verbesserung der Zusammensetzung des Mörtels minimiert werden (Abb. 10.28).

Abb. 10.29 Schwindrisse,
sog. Y-Risse



- **Schwindrisse**

Es handelt sich nicht immer, aber meistens um typisch putzbedingte, aber beruhigbare, netzförmige oder auch einzelne, jedoch verzweigte Y – förmige Risse. Sie entstehen etwa ein bis zwei Monate nach dem Aufbringen auf das Mauerwerk. Ihre Rissflanken lösen sich häufig vom Untergrund, was allerdings immer von der Hafteigenschaft des Putzes abhängt.

Schwindrisse treten immer dann auf, wenn das Mauerwerk und der Putz oder die einzelnen Putzschichten nicht richtig aufeinander abgestimmt sind. Es gilt die Faustregel: Jede Putzschicht muss weicher eingestellt sein als ihr unmittelbarer Untergrund, d. h. das Mauerwerk muss härter sein als die Putzlage auf ihm, die jeweils untere Putzschicht härter als die obere und so fort bis zur Oberfläche hin. Außerdem können solche Risse durch haftungsstörende Schichten wie mürbe Altanstriche, Staub und Waschschleier, die als Folge einer nachlässigen Reinigung auf dem Mauerwerk geblieben sind, verursacht werden. Ein besonders häufiger Grund für Schwindrisse liegt darin, dass die vorgeschriebenen Standzeiten für die einzelnen Putzschichten nicht eingehalten worden sind, d. h. der Oberputz wurde schon aufgetragen, obwohl die untere Putzschicht noch nicht ausreichend ausgehärtet und daher ihr Schwindprozess noch nicht abgeklungen war. Die Nachbehandlung wird oft sehr lax ausgeführt, obwohl die Putze besonders im Sommer leicht „verbrennen“ oder austrocknen (Abb. 10.29).

- **Kerbrisse**

Es handelt sich um putzgrundbedingte und damit nur bedingt beruhigbare, diagonal von den Ecken einer rechteckigen Öffnung im Mauerwerk ausgehende Risse, die durch aus thermischen oder hygrischen Längenänderungen stammenden Scherspannungen im Bereich der Fenster- oder Türöffnungen entstehen. Sie können im schlimmsten Fall diagonal durch die ganze Putzschale gehen. Der Grund dafür sind zumeist zu harte Putze, bei denen eine Diagonalarmierung in den Eckbereichen der Öffnungen fehlt.

- **Fugenrisse**

Es handelt sich um typisch putzgrundbedingte und damit nur bedingt beruhigbare, entlang der Lager- und Stoßfugen des Mauerwerks verlaufende Risse mit

Abb. 10.30 Fugenrisse an der Wand der Kalvarienberg-Kapelle in Schnaittach/Mfr



Rissbreiten von 0,05 bis 0,15 mm. Sie treten zumeist innerhalb der ersten beiden Jahre nach Fertigstellung des Putzes auf. Sie entstehen, weil entweder das Mauerwerk aus großformatigen Steinen seine durch hygrische oder thermische Spannungen erzeugte Verformungen nicht schadlos an den Putz weitergeben kann oder weil sich die Putzdicke in den Mauerwerksfugen vergrößert. Werden nämlich am alten Mauerwerk die Fugen nicht steinbündig verschlossen, so wird im Bereich der Fuge der Putz wesentlich dicker aufgetragen als auf der Steinoberfläche, was mit großer Sicherheit zu Fugenrissen führt (Abb. 10.30).

Aber auch in solchen Fällen, wo der Putz plötzlich wesentlich dünner wird, wie beispielsweise über etwa für eine Außenbeleuchtung auf das Mauerwerk gegipsten Elektrokabeln, entstehen schnell Putzrisse am Kabel entlang. Im Bereich der Gipsbatzen können Risse selbstverständlich durch Gipstreiben entstehen, wenn im Fassadenputz zementhaltige Bindemittel eingesetzt werden.

- **Wärmebrückenrisse**

Es handelt sich um typisch putzgrundbedingte und damit nicht beruhigbare, horizontal verlaufende Risse bis zu einigen Zentimetern Breite, die immer dann entstehen, wenn zwei verschiedenen wärmeleitende Baustoffe aufeinandertreffen, z. B. im Bereich des Auflagers einer Stahlbetondecke oder dort, wo unterschiedliches Steinmaterial im Mauerwerk aufeinandertrifft, oder in Zonen, wo die Mauerdicke einer Fassade geändert wurde, also zumeist am Übergang von einem Stockwerk in das nächste (Abb. 10.31).

- **Setzungsrisse**

Es handelt sich um typisch bauwerksbedingte und damit nicht beruhigbare, entweder diagonal oder in den Mauerwerksfugen zum sich setzenden Bauteil hin verlaufende Risse mit einer sich allmählich sich weitenden Rissbreite von 0,1 mm bis hin zu weit auseinanderklaffenden Rissflanken. Ursache dafür kann sowohl die Setzung des Fundaments als auch der horizontale Schub von Decken-gebälk, Gewölben oder Dachstühlen sein. Setzungsrisse können erst nach einer erfolgreichen Verfestigung des Mauerwerks geschlossen werden (Abb. 10.32).

Für die Instandsetzung von PutzrisSEN haben sich unterschiedliche Verfahren bewährt: (Weber 1996a, 1996b)

Abb. 10.31 In das Mauerwerk der Treppenhauswand wurde ein Betonringanker eingesetzt. Die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit hat zu diesem Wärmebrückenriss geführt



Abb. 10.32 Bamberg, Dominikanerkloster. Vorläufig gesicherter Setzungsriß in der Wand



Zunächst solche für die Sanierung von Einzelrissen, dann solche für flächige Rissbildung. Typische Einzelrisse sind Deckenschubrisse, typische Flächenrisse entstehen durch Spannungen, an den Fugen des Mauerwerks entlang oder durch Schwinden des Putzes bzw. des instandgesetzten Mauerwerks unter ihm. Grundsätzlich können nur solche Risse instandgesetzt werden, auf die keine dynamischen Kräfte mehr wirken und ihre Rissflanken sich deshalb nicht mehr bewegen.

Einzelrisse werden mit Hilfe dreier Instandsetzungsmöglichkeiten saniert: dem starren Rissverschluss, der Rissüberbrückung und dem flexiblen Rissverschluss.

Starre Rissverschlüsse verlangen folgende Arbeitsschritte: Zunächst Aufweiten der Ränder, dann Grundierung mit einer festigenden Imprägnierung, danach Verfüllen des Risses mit einem möglichst elastischen, etwa einem kunstharzmodifizierten mineralischen oder einem organisch gebundenen Feinmörtel und schließlich eine Angleichung an die Struktur des den Riss umgebenden Oberputzes.

Rissüberbrückungen führt man im Bereich von Materialwechsel oder über Wärmebrücken aus. Jetzt wird der alte Putz beiderseits des Risses in einer Breite von mindestens 20 cm entfernt. Um den neu aufgetragenen Putz von dem sich weiter-

Abb. 10.33 Detail einer Überbrückung eines Holzbalkens im Mauerwerk: Deutlich sieht man, dass das Streckmetall auf dem Balken angenagelt wurde, also auf dem Teil, der sich stets bewegt. Der Putzschaden ist nicht zu vermeiden!



hin dynamisch verhaltenden Putzgrund zu entkoppeln, wird auf dem Mauerwerk eine Trennlage z. B. ein bituminöses Papier aufgebracht. Dann befestigt man darauf einen Putzträger, z. B. ein Drahtgewebe mit einer weiten Maschenweite oder ein Rabitzgewebe. Es muss darauf geachtet werden, dass der Putzmörtel durch den Putzträger hindurch und ihn umhüllend bis zur Trennlage aufgetragen werden kann, was beispielsweise ein Putzträger aus Streckmetall zumeist verhindert. Wenn Holzbalken im Mauerwerk vorhanden sind, werden die am Holz entlang entstandenen Putzrisse ebenfalls durch einen Putzträger überbrückt, wobei darauf zu achten ist, dass die Handwerker nicht etwa aus Bequemlichkeit das Drahtgewebe am Holzbalken festnageln, statt es im Mauerwerk zu verankern. Oberhalb des Putzträgers wird dann ein zweilagiger Außenputz mit einer Oberflächenstruktur wie der vorhandene Putz aufgebracht. Rissüberbrückung mit einem hochreißfestem Glasfasergewebe, das als Armierung nur wenige Zentimeter neben dem Riss in den Putz eingebettet wird, sollte am Außenputz besser unterbleiben (Weber 1996b, Abb. 10.33).

Flexible Rissverschlüsse können freilich nur bei geradlinig verlaufenden Rissen z. B. bei horizontalen Schubrissen angewendet werden, denn solche Verfahren bedeuten nichts anderes, als die Umwandlung des dynamischen Risses in eine Dehnungsfuge. Sie werden an historischem Mauerwerk nur selten zum Einsatz gelangen können, da eine sichtbare Dehnungsfuge meistens störend wirkt. Trotzdem seien die dafür erforderlichen, einzelnen Arbeitsschritte kurz umrissen: Der Riss wird zunächst auf des Vierfache einer zu erwartenden Rissrandbewegung, jedoch mindestens zu einer 8 mm breiten Fuge aufgeweitet. Anschließend wird eine feste Imprägnierung als Grundierung der Fugenflanken aufgebracht. Die Fuge wird dann mit einer Schaumstoffschurz hinterfüllt und anschließend mit einem plastoelastischen, überstreichbaren Fugendichtstoff auf Acrylsiliconbasis verfüllt. Statt des Fugendichtstoffs wird oft auch ein Dehnungsfugenprofil aus Kunststoff eingebaut (Weber 1996b).

Flächige Nachbesserungen von Putzen in Rissbereichen können mit Hilfe organischer, rissüberbrückender Beschichtungssysteme, mit mikroporösen, rissfüllenden Beschichtungssystemen, mit mineralischen Oberputzen, mit mineralischen, gewebearmierten Spachtelungen, mit Aufbringen eines Wärmedämmputzes bzw.

Wärmedämmverbundsystems oder gar mit einer vorgehängten Fassade ausgeführt werden. Letzteres führt selbstverständlich zu einer kompletten Neugestaltung der Fassade. Bei den organischen, rissüberbrückenden Beschichtungen handelt es sich um solche auf Kunstharzbasis. Sie können grundsätzlich zur Behandlung aller Risse eingesetzt werden, sogar solcher mit noch vorhandener Flankenbewegung. Grundsätzlich sollten in letztgenannten Fällen Berater des Herstellers hinzugezogen werden. Da diese Systeme einen höheren Diffusionswiderstand sowohl gegenüber Wasserdampf als auch Kohlendioxid aufweisen, sind sie für Kalkputze der Mörtelgruppe P I oder kalkreiche Putze P II völlig ungeeignet. Außerdem sind rissüberbrückende Beschichtungssysteme für Putze auf historischem Mauerwerk zumeist nicht zu empfehlen, weil bei diesen Beschichtungen eine Hinterfeuchtung absolut ausgeschlossen werden muss. Wegen der dort fast immer vorhandenen Feuchte wird es unweigerlich zu Schäden kommen. Schrumpf- oder Sackrisse wird man mit rissverfüllenden Beschichtungen aus wasserabweisenden, siliconharzvergüteten Dispersionssilicat-Füllfarben zufriedenstellend instandsetzen können. Als mineralische Oberputze werden kunststoffvergütete Renovierputze mit Kalk, Zement oder Silikat als Bindemittel eingesetzt. Bei den mineralischen, gewebarmierten Spachtelungen und mineralischen Oberputzen wird die gerissene Putzfläche zunächst gespachtelt. Dann wird ein Glasfasergewebe in zwei Lagen Armierungsmörtel eingebettet und schließlich ein wasserabweisender, mineralischer Oberputz aufgetragen. Größere Einzelrisse werden zuvor, wie bereits beschrieben, behandelt. Am Altbau ist dieses Verfahren zur Instandsetzung des Fassadenputzes oft wegen seiner glatten Putzstruktur nicht geeignet.

10.5 Beschichtungen

Die farbige Fassung von Naturstein hat einen sich zu allen Zeiten immer wieder verändernden Stellenwert gehabt. Die Gründe für den steten Wechsel in der Auffassung vom Wert einer farbigen Beschichtung liegen sicher auch in den Bauschäden, die oftmals auf die Beschichtungen zurückgeführt wurden. Mauerwerk ist auf keinen Fall eine einheitliche, homogene Beschichtungsfläche. Hier müssen heutzutage der Mineraloge und der Chemiker zusammenwirken. Außerdem kommt es dabei immer auch auf die Schutzwirkung einer Beschichtung an. Im Gegensatz zu früheren Jahrhunderten stellt die Chemie heute Farben her, die Natursteine lang dauernd vor Witterungseinflüssen sichern können. Die farbigen Beschichtungen haben sich also geradewegs zu schadenverhütenden Behandlungsmitteln für historisches Mauerwerk entwickelt (Wehlte 1985).

Bevor eine bestimmte Beschichtung ausgewählt werden kann, müssen selbstverständlich die im Mauerwerk verwendeten Natursteine und der Fugenmörtel untersucht werden (Kap. 6). Hat man alle wichtigen Kenndaten und Parameter des zu beschichtenden Mauerwerks erfasst, kann der dafür geeignete Beschichtungsstoff ausgewählt werden. Bei historischem Mauerwerk darf aber die naturwissenschaftliche Erkenntnis nicht über andere Gesichtspunkte wie restauratorischer Befund,

denkmalpflegerische Zielsetzung, Reversibilität einer Beschichtung oder stadtbildpflegerische Einbindung dominieren.

Farbfassungen für Natursteine sind prinzipiell dieselben wie sie auch für verputzte Fassaden eingesetzt werden, und so wurden solche aus Kalk- oder Kalkkaseinfarben, Ölfarben, zweikomponentige reine Silikatfarben, einkomponentige Dispersionssilikatfarben, Dispersions- und Polymerisatharzfarben und Siliconharzfarben angewendet. Die Erfahrung mit solchen Beschichtungen hat die Auswahl auf inzwischen bewährte ausgefiltert und die Anwendung auf silikatische Werkstoffe und Siliconharzfarben verengt (Brandes 1999). Dies zeigt ein Überblick über die verschiedenen Farbbebeschichtungen sehr deutlich (Weber 1999).

- **Kalk- und Kalkkaseinfarben**

Sie werden in der Regel aus einem eingesumpften Weißkalk hergestellt (Wehlte 1985). Das Eingumpfen ergibt eine Verteilung des Kalkes, die dem Anstrich Transparenz verleiht. Kalkfarben sind reversibel und können problemlos z. B. durch einfaches Abstrahlen wieder entfernt werden. Besonders hervorzuheben ist ihre hohe Wasserdampfdurchlässigkeit. Andererseits bieten sie dem Mauerwerk keinerlei Feuchteschutz und beeinflussen die mit der Wasseraufnahme einhergehenden Schäden überhaupt nicht. Dazu ist das von Kalkfarben gebildete Calciumcarbonat sehr empfindlich gegen saueren Regen, der es binnen kürzester Zeit zerstört und abwäscht. Volle satte Farben lassen sich auf Kalkbasis nicht herstellen, es werden wegen der eingeschränkten Pigmentierung immer nur Pastelltöne entstehen. Deshalb hat man seit alters den Kalkfarben organische Stoffe wie Leinöl oder Kasein (Quark) zugesetzt, was die Witterungsbeständigkeit der Kalkfarben erheblich erhöhte. Kalkkaseinfarben lassen sich auch wesentlich besser pigmentieren als Kalkfarben. Gleichwohl werden auch sie heute kaum mehr als Mauerwerksbeschichtungen im Außenbereich eingesetzt.

- **Ölfarben**

Sie werden heutzutage kaum mehr auf Natursteinen eingesetzt, müssen aber als vorhandener Altanstrich z. B. beim Aufbringen eines neuen, rein silikatischen Anstrichs berücksichtigt werden. Ölfarben führen zu harten oberflächennahen Schichten, die zur Krustenbildung neigen. Dies im Verein mit der geringen Wasserdampfdiffusion und Gasdichtigkeit hat dazu geführt, dass Ölfarben heute keine Rolle mehr bei der Beschichtung von Fassaden spielen.

- **Dispersions- und Polymerisatharzfarben**

In jedem Baumarkt billig zu kaufen, haben Dispersionsfarben nach dem Zweiten Weltkrieg einen wahren Triumphzug als Beschichtungsmittel auch auf Mauerwerk erlebt. Als sich dann die ersten gravierenden Schäden einstellten, erkannte man, dass solche Farbsysteme auf Natursteinwänden allenfalls bedingt geeignet sind. Dies liegt insbesondere an ihrer hohen Dichtigkeit, die Wasserdampf und Gase nicht hindurch lässt. Deshalb sind die Dispersionsfarben heute als Beschichtungsstoffe für Natursteinmauerwerk bedeutungslos. Das gilt auch für die Polymerisatharzfarben wie Acrylatfarben oder Acrylatlasuren.

- **Silikatfarben**

Seit mehr als 130 Jahren, als die Farben der Fa. Keim auf den Markt kamen, werden Silikatfarben mit großem Erfolg auf Mauerwerk angewendet. Besonders

Abb. 10.34 Fulda, Altes Rathaus. Der Sandstein wurde mit Silikatfarben gefasst



günstig lassen sich Silikatfarben als Lasuren einsetzen, um bei der Restaurierung entstehende, oft sehr störende Farbunterschiede des Natursteins auszugleichen. Allerdings gibt es Natursteine, die für Silikatfarben nicht geeignet sind. Darunter fallen die sehr empfindlichen, weichen Sandsteine, die eine zu starke Verhärtung ihrer Oberfläche durch die Wasserglasbindemittel erfahren. Es kann dann zu Schuppen- oder Schalenbildung kommen. Die Alkalität der Silikatfarben ist außerdem der Auslöser für braune, irreversible Verfärbungen auf dem Mauerwerk, wenn die Mauersteine Eisen- oder Manganverbindungen enthalten. Daher kann man Silikatfarben nicht ohne eine vorhergehende genaue Untersuchung der Oberfläche des Steinmaterials einsetzen. Silikatfarben bieten keinen Feuchteschutz, da sie porös sind und keine hydrophobierende Zusätze aufweisen. In bestimmten Fällen wird man sie in einem zweiten Arbeitsgang mit einer hydrophobierenden Imprägnierung überziehen müssen (Abb. 10.34).

- **Dispersionssilikatfarben**

Neben den bereits genannten zweikomponentigen, reinen Silikatfarben stellt die Industrie seit einigen Jahrzehnten auch Einkomponentensysteme her, die neben Kaliumsilikat oder Kaliwasserglas auch Kunststoffdispersion enthalten. Der Anteil an Dispersion soll dabei nicht mehr als 5 % betragen. Um sie wasserabweisend auszurüsten, mischt man diesen Farben Silikonharzemulsionen bei. Die beste Eigenschaft dieser Farbsysteme ist ihre hohe Wasserdampfdurchlässigkeit, die geringe kapillare Saugfähigkeit und die gute Haftung auf dem Mauerwerk. Sie sind also für Natursteinmauerwerk sehr gut geeignet. Sie lösen aber wegen ihrer Alkalität die gleiche Reaktion bei eisen- und manganhaltigen Natursteinen aus wie reine Silikatfarben. Als Lasuren sind die Dispersionssilikatfarben weniger gut einsetzbar.

- **Silikonharzfarben**

In den letzten zehn Jahren werden für Natursteinoberflächen immer häufiger Silikonharzfarben eingesetzt. Ihr Vorteil liegt gleichsam auf der Hand: Sie sind chemisch neutral, also nicht alkalisch und können im Gegensatz zu den Silikatfarben auf eisen- oder manganhaltigen Natursteinen problemlos eingesetzt werden. Sie sind mikroporös wie die Silikatfarben, was ihnen eine ebenso gute Gas- und Wasserdampfdurchlässigkeit verleiht. Dazu entsteht durch die Verwendung von Sili-

Abb. 10.35 Fassade eines Wohn- und Geschäftshauses mit Silikonharzfarbe beschichtet



konharzemulsion als Bindemittel dieser Farben eine innere Hydrophobie, die dem Mauerwerk neben seiner Farbigkeit auch noch einen ausgezeichneten Wasser- und Feuchteschutz gewährt. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass man sie gut als Lasur anwenden kann. Silikonharzfarben lassen sich in jedem Lasurgrad und in jedem Farbton derart einstellen, dass auch große Oberflächen ohne Problem farbig gefasst oder lasiert werden können. Dabei lassen sich die Farbunterschiede etwa von Sandsteinen sehr gut ausgleichen. Wenn etwa eine Reinigung den Naturstein zu stark schädigen würde, kann auf sie verzichtet werden, wenn man mit Silikonharzfarben die hässlichen Verfleckungen beschichtet. Im Gegensatz zu reinen Silikatfarben können Lasuren aus Silikonharzfarben in großer Menge angemischt und ganze Gebäudeensembles mit der gleichen Lasur beschichtet werden (Abb. 10.35). Oberflächen von Natursteinmauerwerk sind häufig verwittert und sanden oder mehnen deshalb ab. Bevor auf ihnen eine Farbschicht aufgebracht werden kann, müssen diese selbstverständlich gefestigt werden. Derartige mit Kiesel säureethylester gefestigte Natursteinoberflächen lassen sich problemlos mit Silikonharzfarben oder reinen Silikatfarben beschichten. Bei chemischen Reinigungsverfahren sieht die Sache allerdings erheblich problematischer aus: Die Säuren oder Alkalien enthaltenden Reinigungsmittel können bauschädliche Salze bilden (Kap. 8) oder Eisen- und Manganverbindungen aktivieren, die zu den besagten hässlichen braunen Fle-

Abb. 10.36 Algen auf der Fassade einer Gebäudeaußenwand



cken und Verfärbungen führen. Beabsichtigt man Naturstein farbig zu beschichten, sollte er grundsätzlich nur mit einem die Oberfläche schonenden Strahlverfahren gereinigt werden, das gleichwohl ein Entfernen der Schmutz- und Schadstoffkrus-ten bewirkt. Außerdem sollte man der Algenbildung entgegenwirken, indem man dem Beschichtungsstoff algizid wirkende Additive zusetzt. Ansonsten wird im schattigen Bereich auch auf dem beschichteten Mauerwerk eine Vergrünung durch Algenbewuchs eintreten (s. Kap. 10.6.1) (Abb. 10.36).

Auf salzbelastetem Mauerwerk hält kein Anstrich auf Dauer. Hier werden die Grenzen des derzeit technisch Machbaren erreicht. Allerdings werden inzwischen schon Farben entwickelt, durch die hindurch die Salzkristallisation vor sich geht, ohne dass die Beschichtung zerstört wird. Die Salzkristalle werden dann von Zeit zu Zeit abgekehrt, ohne dass der Farbanstrich beeinträchtigt wird. Hier bahnt sich eine sehr zukunftsträchtige Entwicklung an.

10.6 Biologische Korrosion

Eine weitere Ursache für die Verwitterung mineralischer Baustoffe stellt die biologische Korrosion dar. Es handelt sich dabei um den schädlichen Einfluss von pflanzlichen und tierischen Lebewesen auf Verputz und Stuck (Maier 2007).

Die biologische Korrosion besteht im Wesentlichen aus dem:

- Bewuchs mit Algen, Flechten oder größeren Pflanzen
- Bewuchs mit Schimmelpilzen
- mikrobiellen Befall
- Einfluss von Bakterien.

Abb. 10.37 Mauerwerk und Pfeiler mit starkem Bewuchs



Wird der Putz feucht, bindet er Staub aus der Umgebungsluft. Diese feuchte Staubschicht wiederum bildet einen ausreichenden Nährboden als Lebensgrundlage für Mikroorganismen. So wachsen Algen, Flechten und Moose sehr gerne auf schattigen und feuchten Außenputzen, auch auf dem Putz eines Wärmedämmverbundsystems WDVS. Diese Pflanzen verunzieren nicht nur das schöne Aussehen des Putzes, sondern sie binden ihrerseits weitere Feuchte und verhindern somit das Austrocknen des Putzes. Damit kann Frost den feuchten Außenputz abplatzen lassen. Zusätzlich werden Schadstoffe aus der Luft, die chemische Korrosion verursachen, auf der Putzoberfläche gebunden.

Größere Pflanzen wachsen in den Rissen und Spalten des Verputzes. Ihre Wurzeln sprengen die Risse weiter auf und binden Staub und humose Teilchen aus der Umgebungsluft. Die humosen Wurzelstücke binden sehr viel Feuchte und geben diese durch Sorption in den umgebenden Putz bzw. in das darunter befindliche Mauerwerk ab. Sie lösen dadurch sowohl Frostschäden als auch Salzschäden aus (Abb. 10.37).

Auf der Oberfläche des feuchten Innenputzes wird bei fehlender Wärmedämmung ebenfalls zunächst Staub gebunden und infolgedessen der Nährboden für Schimmelpilze geschaffen (s. Kap. 10.6.2 Schimmelbefall).

Mikrobieller Befall entwickelt sich auch durch spezielle Bakterien, die so genannten „*Nitrobakter*“ oder „*Nitrifikanten*“ (Venzmer 2001). Sie oxidieren das Nitrit aus der Luft zu Nitrat und wirken bei der Salzbildung an der Wandoberfläche aktiv mit. Andere Bakterienstämme, so genannte „*Thiobakter*“ oder „*chemoorganotrophe Mikroorganismen*“, erzeugen Sulfate. Diese Bakteriengattung gehört zu den so genannten „*autotrophen*“ Bakterien, d. h. sie benötigen für ihren Stoffwechsel keine organischen Stoffe. Die Bausteine für ihren Stoffaufbau entnehmen sie ausschließlich anorganischen Verbindungen. So benötigen sie für ihren Kohlenstoffbedarf unbedingt CO_2 , das sie bei mangelndem Vorkommen im Wasser auch aus den Karbonaten des Putzes oder der farbigen Beschichtung des Mauerwerks herausbrechen können. In der Folge steigt der pH-Wert. Da diese Bakterien autotroph leben

Abb. 10.38 Algenbefall über gekippten Fenstern



und diese Form sehr energieaufwändig ist, vermehren sie sich relativ langsam. Die von ihnen verursachten Schäden treten vor allem bei Wandmalereien auf Putz auf.

10.6.1 Algenbefall

Algen und Pilze an der Außenwand von Gebäuden oder Stützmauern gab es schon immer. Seit Kraftwerke nur noch mit Entschwefelungsanlagen betrieben werden, Gebäude hochwärmegedämmt sind und mit glatten Fassaden ohne Vordächer und vorspringende Simse gebaut werden, breiten sich an den Außenwänden Algen, Pilze und andere Mikroorganismen immer mehr aus. Ihr Wachstum, früher durch schwefelhaltigen, so genannten „sauren“ Regen gebremst, wird heute durch die Reinhaltung der Luft gefördert. Besonders die nächtliche Oberflächenfeuchte, die Taubildung infolge von Kondensation an kalten hochwärmegedämmten Fassaden, sorgt für ideale Wachstumsbedingungen für mikrobiellen Bewuchs (Abb. 10.38).

Das Wachstum solcher Mikroorganismen basiert stets auf folgenden drei Grundvoraussetzungen: An der Fassade müssen zunächst keimungsfähige Mikroorganismen, wachstumsfördernde klimatische Verhältnisse und schließlich geeignete Nahrung vorhanden sein. Die normale Umgebungsluft enthält immer ungezählte Pilzsporen und Algenzellen. Oft an Staubpartikel angelagert werden diese mit dem Wind verbreitet. Sie setzen sich an Wänden fest und, wenn sie an diesem neuen Standort günstige Wachstumsbedingungen finden, breiten sich die zunächst mikroskopisch kleinen Keime zu sichtbaren Kolonien aus. Die Fassade bekommt großflächige grüne, rote oder schwarze Verfärbungen.

10.6.1.1 Bauphysikalische Zusammenhänge

An verputzten Fassaden oder solchen mit verputzter Außenwärmédämmung kommen immer dann Algen- bzw. Pilzkolonien vor, wenn die Umgebungs- oder Materialfeuchte zu hoch ist. Da heute eine der wichtigsten Aufgaben der Gebäudehülle

der Wärmeschutz ist, kann sich die Außenhaut des Gebäudes nicht mehr aufwärmen und abtrocknen. In den letzten 25 Jahren haben sich nämlich die wärmetechnischen Anforderungen an Außenwände drastisch erhöht. Vergleicht man die Wärmeschutzverordnungen miteinander, so stellt man fest, dass die Wärmedurchgangskoeffizienten, die zulässigen U-Werte, heute das Doppelte von 1977 betragen. Durfte der U-Wert einer Außenwand damals durchaus $0,90 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ betragen, so senkte man ihn bis heute auf $0,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ab.

Für den mikrobiellen Bewuchs auf den Gebäudewänden lässt sich ein kausaler Zusammenhang, also eine Ursachen-Wirkungskette herstellen, deren erstes Glied die von den Wärmeschutzverordnungen geforderten, ständig strenger Vorgaben zum zulässigen Wärmeverlust darstellen, während das letzte Glied in der Kette der Bewuchs ist.

Die Ursache-Wirkungskette des Fassadenbewuchses:

- geringer U-Wert ($\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$)
→ dickere Wärmedämmung
→ kleinerer Wärmefluss
→ tiefere äußere Oberflächentemperatur
→ längere Kondensatperioden
→ größere Wasserbelastung
→ mehr Bewuchs bzw. Bewuchs wird möglich
nach (Büchli 2006 S. 31) (→=daraus folgt)

Steigende Vorgaben der Energieeinsparverordnungen EnEV erzwangen höhere Wärmedämmdicken an Außenwänden. Heute werden zumeist Wärmedämmungen in einer Dicke von 9 cm bis zu 30 cm und mehr eingebaut (Thermoskannen-Prinzip). Der geforderte U-Wert, der früher noch problemlos mit dickerem massivem Ziegelmauerwerk hergestellt werden konnte, ließ sich bald schon nur noch durch den Einbau spezieller Wärmedämmsschichten erfüllen. Am Anfang der Entwicklung stand das zweischalige Mauerwerk, bei dem die Wärmedämmsschicht in der Wandmitte eingebaut wurde. Erst mit dem Auftreten von negativen Auswirkungen dieser Konstruktion und der Entwicklung von bewehrtem Dünnschicht-Verputz gelang die bauphysikalisch vorteilhaftere Anordnung der Dämmung außerhalb der Tragkonstruktion. Auf eine hinterlüftete Verkleidung konnte nun ebenfalls verzichtet werden.

Die Folge der Zunahme der Wärmedämmdicke ist die gewünschte Einsparung an Heizenergie, da der Wärmefluss durch die Wand verringert wird. Durch den reduzierten Wärmefluss wird aber weniger Energie an die äußere Wandoberfläche geführt, sie wird folglich von innen her weniger stark aufgewärmt. Deshalb sinkt die Oberflächentemperatur im Winter häufig unter die der Außenluft ab, es kommt zur Tauwasser- bzw. zur Eisbildung. Jeder Autofahrer kennt dieses Phänomen, wenn er im Winter morgens das Schwitzwasser von seinen Autoscheiben abwischen oder das Eis abkratzen muss.

Die tiefere äußere Oberflächentemperatur sorgt für eine längere Kondensatperiode. Bestand in der Heizperiode für ein schlecht gedämmtes Mauerwerk mit einem U-Wert von $0,90 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ das Risiko von nächtlichem Tauwasser an den Fassaden nur während zwei Monaten, so besteht es bei einem gut gedämmten Mauerwerk mit einem U-Wert von $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ während sechs Monaten oder länger. Die Feuchtigkeitsbelastung steigt also um ein Mehrfaches, je besser die Wärmedämmung auf der Außenwand wird (Büchli 2006).

Mit einer verlängerten Kondensatperiode steigt auch die Wasserbelastung der Oberfläche. Die Fassade bleibt also länger feucht. Für den Befall durch Mikroorganismen ist aber nicht nur das Vorhandensein von Feuchte wichtig, sondern natürlich auch die Dauer, während der diese Feuchtigkeit zur Verfügung steht. Das Algenwachstum wird also wesentlich intensiver.

Ähnliche Verhältnisse wie an der verputzten Außenwärmedämmung finden sich auch an einer hinterlüfteten Fassadenverkleidung. Zusätzlich bildet sich bei dieser Konstruktionsart auch Tauwasser auf der Rückseite der Bekleidung. Saugfähige Bekleidungsmaterialien werden also auch von hinten befeuchtet.

Anders verhält es sich bei massiven Fassadenkonstruktionen. Sie vermögen Wärme zu speichern und bei fallenden Temperaturen wieder abzugeben. Ein Backsteinmauerwerk mit einem U-Wert von $0,45 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ kann diesen so genannten „*Kachelofeneffekt*“ besitzen. Die nächtlichen Strahlungsverluste werden in diesem Fall durch einen Wärmenachschub aus der im massiven Mauerwerk gespeicherten Wärme ersetzt. Diese positiven Folgen des wärmespeichernden Massivmauerwerks können freilich immer nur dann eintreten, wenn die Sonnenwärme am Tag den Wärmespeicher ausreichend gefüllt hat. Wenn aber die Sonne nicht auf die Oberfläche scheinen kann, z. B. infolge bedeckten Himmels, dichten Baumbewuchses am Gebäude oder nördlicher Himmelsrichtung der Fassade, so reicht die gespeicherte Energie nicht aus, die nächtliche Abkühlung auszugleichen. Es wird dann auch an solchen Außenwänden zur Veralgung kommen.

Ein neuerdings viel diskutiertes Problem stellt die Verschmutzung und der biologische Befall an WDVS-Oberputzen dar. Da ein solches System kaum noch Energie von innen an seine Oberfläche kommen lässt, trocknet diese nach einem Regen nur sehr langsam ab. Die Feuchte bindet die Luftverschmutzung, zusammen bieten sie für Algen und mikroskopische Pilze wie Schwarz-, Bläue- und Schimmelpilze einen idealen Nährboden. Deshalb entstehen schon bald nach der Fertigstellung hässliche Verfärbungen auf der dem Wetter ausgesetzten Gebäudeseite. Die Fassade muss dann aufwändig gereinigt werden. Nur ein adäquates Anstrichsystem, z. B. in Nanotechnik mithilfe von winzigen Titanoxid-Partikeln, hilft, solche Schäden zu vermeiden.

10.6.2 Schimmelpilzbefall

Sehr häufig wird vor allem nach Wohnungsmodernisierungen über Schimmelpilzbefall geklagt. Schimmelpilze erzeugen nicht nur unangenehme Eigengerüche, sondern auch Gifte, die zu Erkrankungen oder Allergien bei Menschen führen können.

Abb. 10.39 Schimmelbefall in der Raumecke



Mit der Verringerung des Austausches der Luft in den Wohnungen und mit der Entstehung von Wärmebrücken als Folge der Sanierung u. Ä. werden die schon immer vorhandenen Schimmelpilze durch lokale Konzentrationserhöhungen auf einmal sichtbar, wie z. B. Schimmelklecken an der Tapete. Die fachgerechte Beseitigung des Schimmels ist daher sowohl für den langfristigen Erhalt des Gebäudes als auch für die Gesundheit der Bewohner unverzichtbar (Abb. 10.39).

Schimmelpilze sind allgegenwärtig (ubiquitär) vorkommende Pilzarten, die bei erhöhtem Auftreten bei Menschen deutliche gesundheitliche Beeinträchtigung auslösen können. Viele Bewohner von mit Schimmelpilz belasteten Räumen leiden daher häufig unter Kopfschmerzen, Augenbrennen und Erkältungssymptomen. Bei entsprechender Neigung kann es bei längerem Einatmen von Schimmelpilzsporen zu Allergien kommen. Diese körperliche Abwehrreaktion kann zu einem Bronchialasthma führen und andere gesundheitliche Probleme an den Atmungsorganen verursachen.

Schimmelpilz wächst immer nur dann an Wänden und Decken von Wohnungen, wenn die Voraussetzungen dafür vorhanden sind. Zunächst bedarf es einer erhöhten relativen Luftfeuchtigkeit unmittelbar in der Grenzzone oberhalb der raumseitigen Bauteiloberfläche. Diese schlägt sich auf einer kalten Wand oder Decke als Tauwasser nieder. Vor allem poröse, mineralische Baustoffe wie z. B. Wand- oder Deckenputz nehmen die Feuchtigkeit auf und sind dann oberflächennah durchfeuchtet. Die Feuchtigkeit wiederum bindet Staub aus der Raumluft, in dem sich Spurenelemente

Abb. 10.40 Schimmelbefall unter dem Herd



und Fettpartikel befinden. Diese bilden zusammen mit der Feuchtigkeit die ideale Nahrungsgrundlage für Schimmelpilze.

Schimmelpilze wachsen natürlich auch auf anderen Untergründen sehr gerne: etwa auf Textilien wegen des Celluloseanteils, auf Tapeten, insbesondere Raufaser-tapeten, und Tapetenkleister infolge ihres hohen Zucker-, Eiweiß- und Ligninan- teils, auf Kunststoffen und Gummi wegen deren Weichmachern und kohlenstoffhal- tigen Treibmitteln, aber auch auf Farben, insbesondere Dispersionsfarben, wegen der beigefügten Tenside, organischen Zusätzen, Weichmacher, Verdickungsmittel und eventuellen Zuckeranteilen im Quellmittel der Dispersionen (Büchli 2006).

Praktisches Beispiel: Genossenschaftsbau um 1950 In die schimmelpilzfreie Erdgeschoss-Wohnung eines Genossenschaftsbaus aus den Jahren um 1950 waren im Jahre 2002 neue, wärmegedämmte und luftdichte Kunststoff-Fenster eingebaut worden. Zu diesem Zeitpunkt war die Energieeinsparverordnung EnEV 2002 vom 16. November 2001, nämlich am 1. Februar 2002, bereits in Kraft getreten. Die in ihr festgeschriebenen Wärmedämmwerte für Außenwände, Fenster und Kellerdecken wären deshalb einzuhalten gewesen. Zur Beheizung der Räume dienten damals noch an den Wohnrauminnenwänden nahe am Kamin stehende Gasöfen. Im Jahre 2005 sind statt der Gasöfen neue Niedertemperatur-Heizkörper unter den Fenstern im Wohnzimmer, im Schlafzimmer und in der Küche eingebaut worden. Im Wohnzimmer wurde des Weiteren ein Heizkörper an der nördlichen Außenecke, ein Handtuchheizkörper im Bad sowie ein Heizkörper im WC jeweils an der Trennwand angebracht (Abb. 10.40).

Nachdem die Modernisierung abgeschlossen war, traten Schimmelpilze an den Wänden und im Bereich der Übergänge von Fußboden zu Wand bzw. Wand zur Decke auf. Was waren die Ursachen dafür? Die alten Fenster der Wohnung waren nie- mals luftdicht gewesen, sondern wiesen stets Spalten und Ritzen auf, durch die be- ständig Frischluft in die Wohnung einströmen konnte. Infolge dieser Dauerlüftung herrschte eine derartig niedrige relative Luftfeuchtigkeit im Raum, die Tauwasser an den Wänden und Decken nicht zuließ. Die Gasöfen strahlten darüber hinaus Wärme in den Raum ab. Diese Wärmestrahlung erhielt die gegenüberliegenden

Abb. 10.41 Wärmedämmputz im Bereich des Haussockel und rings um das Kellerfenster herum



Wände und die Decken oberflächig, was zu einer erhöhten Oberflächentemperatur der Raumumgebungsflächen führte. Tauwasser vermochte also an den Wänden und Decken nicht zu kondensieren. Die neuen Heizkörper dagegen erwärmen zwar die Luft im Raum, die Wand- und Deckenoberflächen wurden dabei nur in geringem Maße erhitzt. Die Oberflächen der Raumumgebungsflächen blieben also kalt, Tauwasser musste zwangsläufig ausfallen.

Es wurde zudem versäumt, eine Wärmedämmung an den Außenwänden in ausreichendem Maße anzubringen. Die östliche Außenwand zum Hof bestand aus Backsteinmauerwerk und besaß eine Dicke von 43 cm samt Außen- und Innenputz, die westliche Außenwand bestand ebenfalls aus Backsteinmauerwerk, ihre Dicke betrug 45 cm mit Putz. Die beiden fast gleich dicken Wände hatten einen U-Wert $\sim 1,11 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, der bei Weitem geringer war als der gemäß der damals geltenden EnEV 2007 vorgeschriebene $U=0,45 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Die Wände waren also unzureichend gedämmt. Allerdings wurde vor der Kellerwand an der Straßenseite ein zusätzlicher Wärmedämmputz in einer Dicke von ca. 3 cm aufgetragen, was aber die Situation nur unwesentlich verbesserte (Abb. 10.41).

Die Wohnung war außerdem gegen das Treppenhaus und die anschließenden Wohnungen als Baukörper versetzt, d. h. Teile der seitlichen Wohnungswände waren ebenfalls unzureichend gedämmte Außenwände. Sie bildeten in den Raumecken so genannte „geometrische Wärmebrücken“. Bei solchen Wärmebrücken ist konstruktionsbedingt die Wandfläche innen kleiner als außen, d. h. die kältere Außenfläche ist größer als die zugehörige wärmere Wandinnenfläche. Der Wärmefluss in die kältere Zone ist daher ungleich größer als an der geraden Wand. Dadurch musste in diesem Bereich mit einem erhöhten Tauwassermanfall an der inneren Wandoberfläche gerechnet werden.

Der Keller unter der Wohnung besaß eine Kappendecke. Sie bestand aus stählernen Doppel-T-Trägern und quer dazu gespannten, kleinen, gemauerten Gewölben, so genannten Kappen. Die Decke wurde mit weißer Kalkfarbe frisch gestrichen, jedoch nicht wärmegedämmt, wie dies nach EnEV 2007 erforderlich gewesen wäre.

Abb. 10.42 Schimmel auf dem offen liegenden Wasserrohr



Daher zeigten die Wände ein ausgeprägtes Bild des Schimmelbefalls im Bereich des Anschlusses von Boden und Außenwand. Besonders stark wuchs der Schimmelpilz in der jeweiligen Anschlusssecke der Außenwände. Auch auf den offen liegenden Kaltwasserleitungen im WC war der Befall erheblich, da sich an solchen Leitungen stets Kondenswasser niederschlägt (Abb. 10.42).

Die Art des Schimmelpilzes wurde nicht festgestellt. Hier hätte man einen Bau-biologen zuziehen müssen, um den Pilz zu bestimmen. Erst dann hätte man über die medizinische Unverträglichkeit des mikrobiellen Befalls und des weiteren Umgangs mit ihm eine Entscheidung treffen können.

10.6.3 Beseitigung des Schimmelbefalls

Es war sicherzustellen, dass der mikrobielle Befall sich tatsächlich nur an der Oberfläche der Wände befindet. In der Regel muss der befallene Wandputz abgeschlagen und erneuert werden. Ein Abtöten allein reicht nicht aus, da auch von abgetöteten Schimmelpilzen allergische und die Atemwege reizende Wirkungen ausgehen können. Deshalb genügt ein „*Abflammen*“, wie es häufig vorgeschlagen wird, ebenfalls nicht. Tapeten müssen in der Regel abgelöst und fachgerecht entsorgt werden. Gipskartonplatten besitzen eine Papieroberfläche und verhalten sich bei Schimmelpilzbefall ähnlich wie Tapeten. Sie müssen deshalb etwa 30 cm über dem so genannten „*Chromatographierand*“ (=Rand der Zone des sichtbaren Befalls) hinaus ausgebaut und entsorgt werden. Dabei sind die technischen Regeln zur Beseitigung von Schimmelpilzen in Innenräumen des Landesgesundheitsamtes Baden-Württemberg (LGA 2004) und der Leitfaden des Umweltbundesamtes (UBA

Abb. 10.43 Sockelleistenheizung im ausgebauten Dachgeschoss



2005) zu beachten. Insbesondere wenn der Mieter Allergiker ist, muss besondere Sorgfalt bei der Beseitigung des Schimmelbefalls und bei der Sanierung der Wohnung angewandt werden.

Dann ist durch einen Baubiologen zu prüfen, welcher Art der Schimmelbefall ist. Insbesondere die „*Aspergillus-Arten*“ sind in der Lage, die seltene Erkrankung „*Aspergillose*“ zu verursachen.

Die Sanierung bei größerem Schimmelpilzbefall – wie hier gegeben – sollte unbedingt von Fachfirmen vorgenommen werden (UBA 2 2005, Kap. 5). Die ausführende Firma muss ihre besondere Kenntnis im Umgang mit mikrobiellen Sanierungen nachweisen.

Um den Schimmel dauerhaft zu beseitigen, können folgende Maßnahmen ergriffen werden (Maier 1987):

- Die Wärmeluftströme sind zu optimieren, d. h. keine Heizkörperabdeckungen, Abrücken der Möbel von den Außenwänden, Belüftungsöffnungen in Schrank-Sockelleisten, usw. Außerdem kann man die befallenen Wandbereiche verstärkt beheizen.
- Der Einsatz von Sockelleistenheizungen kann den Befall an der Bodenkante entlang verhindern. In die oben mit Schlitzen versehenen Sockelleisten werden dünne Heizungsrohre als Warmwasser- oder Elektroheizungen gelegt, die mit dem neuen Heizungssystem kombiniert werden können. Durch diese Beheizung erfolgt eine Erhöhung der Wandtemperatur, die sich infolge der aufsteigenden warmen Luft auf die Wandfläche oberhalb des Sockels ausbreitet. Nur wenige °C wärmere Oberflächen der Wandbereiche reichen aus, um die Wand trocken zu halten und damit das Wachstum des Schimmelpilzes zu verhindern (Abb. 10.43).
- Auch der Einbau einer Wandflächenheizung oder von unter Putz verlegten Heizmatten kann zu einer ausreichenden Erwärmung der Außenwände, insbesondere in den Außenecken beitragen und die Schimmelpilze erfolgreich am Wachsen hindern.

- Eine Innendämmung aus Kalzium-Silikat-Platten, die so genannten „*Klimaplatten*“, wenigstens bis zur Höhe der Fensterbrüstung würde den Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenwand verringern und dadurch für eine höhere Oberflächentemperatur innen an der Außenwand sorgen. Die zwischen 25 und 60 mm starken Platten werden außerdem den dennoch entstehenden Tauwasserausfall an der Oberfläche aufsaugen und bei Lüftung des Raums die Feuchte wieder an die Raumluft abgeben, denn die Porosität der Platten beträgt 80 bis 90 Volumen-%. Der ph-Wert liegt bei Kalzium-Silikat-Platten im Bereich von 8 bis 10, die Platten sind also hoch alkalisch. Diese Alkalität schützt vor Wachstum des Schimmelpilzes. Zudem wird durch das Trockenhalten der Außenwand an ihrer inneren Oberfläche mikrobielles Wachstum überhaupt verhindert. Ein Vorteil dieser Platten ist, dass der Altplatz erhalten werden kann (s. oben Beispiel: Landschlösschen).
- Eine weitere Möglichkeit stellt die Anwendung eines Schimmelsanierputzsystems dar. Dieser spezielle Putz besitzt eine Wärmeleitfähigkeit von etwa $\lambda_R = 0,125 \text{ W/m K}$, die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ liegt bei 8, die Rohdichte $\rho = 450 \text{ kg/m}^3$. Die Porosität liegt beim Schimmelsanierputz bei 80 Volumen-%, der Putz ist ebenfalls alkalisch. In der Regel muss der alte Innenputz bei Anwendung dieses Sanierputzsystems abgeschlagen werden, denn der Auftrag von wenigstens 30 mm des neuen Putzes auf die Fehlstellen des oft nicht mehr tragfähigen Altplatzes würde an diesen Stellen Putzstärken bis zu 60 mm erbringen, was häufig zu starken Schwindrissen führt.
- Um den ungünstigen U-Wert der vorhandenen Außenwand ausreichend zu verbessern, könnte man auch einen Wärmedämmputz außen aufbringen. Würden hier 5 cm Wärmedämmputz mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_R = 0,080 \text{ W/m K}$ aufgetragen, würde sich der U-Wert auf $0,91 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ verbessern und die Temperatur an der Außenwandinnenseite würde auf $+16,4^\circ\text{C}$ steigen. Jetzt wäre die Gefahr der Bildung von Tauwasser erst ab einer relativen Luftfeuchte von 80 % gegeben. Es empfiehlt sich nicht, den Wärmedämmputz wegen der Gefahr des Schwindens dicker als 10 cm aufzutragen. Um den U-Wert der EnEV 2009 = $0,24 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ zu erreichen, müsste man in diesem Fall besser zu einem WDVS greifen.
- Ein außen aufgebrachtes Wärmedämmverbundsystem WDVS wäre die aufwendigste Lösung des Problems. Jetzt wäre entweder die gesamte Hausaußenwand wärmegedämmt oder die Außenwand vor der von Schimmel befallenen Wohnung müsste gegenüber der übrigen Hauswand mit einem Sockel abgesetzt werden. Es würde sich jedenfalls um einen massiven Eingriff in das Erscheinungsbild der Architektur handeln.
- Da die Betondecke über dem Keller in die Außenwand eingreift, ist hier eine massive Wärmebrücke entstanden. Die Kellerdecke muss deshalb von unten mit wenigstens 80 mm Mineralfaserplatten mit $\lambda_R = 0,040 \text{ W/m K}$ gedämmt werden. Damit ist sichergestellt, dass die Decke nicht mehr derart stark ausköhlt, dass an der Bodenkante der Erdgeschosswohnung Schimmelpilze wachsen können. Auch der Kellersockel außen am Haus muss in diesem Fall gedämmt werden.

- Die Wohnung ist wenigstens im Bereich des Bades und der Küche viermal innerhalb von 24 Stunden stoßweise zu lüften. Die Lüftungsdauer sollte wenigstens fünf Minuten betragen. Eine Lüftung mithilfe der Kippstellung der Fenster oder des Oberlichts erreicht den gewünschten Lüftungsgrad nicht und führt häufig zu Algenbefall oberhalb des Fensters (s. Abb. 10.38). Da es vielen Bewohnern nicht möglich ist, viermal am Tag zu lüften, sollte hier eine kontrollierte Be- und Entlüftung eingebaut werden.
- Die Lüftung ist besonders im Winter effizient, da dann kalte trockene Außenluft die feuchtwarme Raumluft ersetzt. Im Sommer dagegen kann eindringende Warmluft durchaus neues Tauwasser im kalten Bereich an den Innenflächen von Außenwand und Boden bzw. in den Außenwandecken oder auf Wasserrohren erzeugen und das mikrobielle Wachstum beschleunigen.

Am Besten wird durch vierzehntägige Wiederholung der Feuchtemessungen über wenigstens eine Sommer- und eine Winterperiode hinweg der Nachweis erbracht, dass die Sanierungsmaßnahmen zum Erfolg geführt haben.

Literaturverzeichnis

- Arendt, Claus, Technische Untersuchungen in der Altbauanierung, Köln 1994.
- Arendt, Claus, Seele, Jörg; Feuchte und Salze in Gebäuden, Ursachen, Sanierung, Vorbeugung, Grundlagen der Schadensarten und Ursachen, Leinfelden-Echterdingen 1999.
- Balak, Michael, Pech, Anton, Mauerwerkstrockenlegung. Von den Grundlagen zur praktischen Anwendung, Springer Wien, New York 2008².
- Bandmann, Günter, Mittelalterliche Architektur als Bedeutungsträger, Darmstadt 1985⁸.
- Baur-Heinold, Margarete, Bemalte Fassaden – Geschichte, Vorbild, Technik, Erneuerung, München 1981³.
- Der Baumeister, Monatshefte für Architektur und Baupraxis, XIX. Jahrgang, Heft 1, München 1921, S. 1–4.
- Bechert, Tilman Römisches Germanien zwischen Rhein und Maas, die Provinz Germania inferior, München 1982.
- Beck, Friedrich, Henning, Eckart; [Hrsg.] Die archivalischen Quellen, eine Einführung in ihre Benutzung, Veröffentlichungen des Brandenburgischen Hauptarchivs Bd. 19, Weimar 1994².
- Benevolo, Leonardo, Geschichte der Architektur des 19. und 20. Jahrhunderts, 3 Bände, München 1988⁴.
- Bergmann, Norbert, Verformungsgenaues Aufmaß der Marstallwände mit allen vertikalen und horizontalen Deformationen, Gutachten vom 16.2.2000. Staatl. Hochbauamt Ansbach, Reponierte Registratur.
- Binding, Günther, Architektonische Formenlehre, Darmstadt 1987².
- Binding, Günther, Nussbaum, Norbert, Der mittelalterliche Baubetrieb nördlich der Alpen in zeitgenössischen Darstellungen, Darmstadt 1978.
- Böhmer, Heike, Güswelle, Frank, U-Werte alter Bauteile, Arbeitsunterlagen zur Rationalisierung wärmeschutztechnischer Berechnungen bei der Modernisierung, Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart 2005.
- Böker, Hans Josef, Die mittelalterliche Backsteinarchitektur Norddeutschlands, Darmstadt 1988.
- Born, Andrea, Wieckhorn, Thomas, Wunschdenken oder Realität – Oberflächenschutz durch Lötoseffekt, in: Bausubstanz 6/1999, S. 52–54.
- Borsch-Laaks, Robert, Innendämmung – wo ist das Risiko? In: Begleitband zu 1. WTA-Sachverständigentag der regionalen Gruppe WTA-D, EnEV 2007 und Bestand, Weimar (Bauhaus-Universität) 22.11.2007, München 2007.
- Brandes, Christian, Anstriche und Beschichtungen für Bauwerke aus Naturstein, Eigenschaften, Anforderungen und praxisbezogene Anwendung, Renningen 1999.
- Brannekämper, Theo, Die Gründungskonstruktionen und die Grundwasserverhältnisse im Haupt- und Nebengebäude des Ansbacher Schlosses, Gutachten, masch. Manuskript München 1966, Staatl. Hochbauamt Ansbach, Reponierte Registratur.
- Büchli, Roland, Raschle, Paul, Algen und Pilze an Fassaden – Ursachen und Vermeidung, Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart 2006².
- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin – Technischen Regeln für Gefahrstoffe, TRGS 612, Stand Februar 2007.

- Burandt, Walter, Die Baugeschichte der Alten Hofhaltung in Bamberg, Bamberg 1998.
- Cunlife, Barry, Die Kelten und ihre Geschichte, Bergisch Gladbach³ 1991, S. 64–65.
- P. Degryse, M. Van Geet, M. Waelkens, R. Swennen, M. Wevers and W. Viaene, Microfocus Computer Tomography as a Qualitative Approach to Frost Damage in Modern Restoration Mortars (Microfocus Computer Tomographie zur Ermittlung von Frostschäden in modernen Reparaturmörteln) Bauinstandsetzen 1/2001, S. 47–62.
- Donderer, Michael, Die Architekten der späten römischen Republik und der Kaiserzeit: epigraphische Zeugnisse, Erlanger Forschungen Reihe A, Geisteswissenschaften Bd. 69, Erlangen 1996.
- Durm, Josef, Die Baukunst der Griechen, in: Handbuch der Architektur, Zweiter Teil, 1. Band, Leipzig 1910³.
- Durm, Josef, Die Baukunst der Etrusker. Die Baukunst der Römer. in: Handbuch der Architektur, Zweiter Teil, 2. Band, Leipzig 1910³.
- Eckert, Hannes, Kleinmanns, Joachim, Reimers, H., Denkmalpflege und Bauforschung (Empfehlungen für die Praxis, SFB 315), Karlsruhe 2000.
- Eckstein, Günter, Grömer, Johannes, Empfehlungen für Bauaufnahmen, Genauigkeitsstufen, Planinhalte, Raumbuch, Kalkulationsrahmen, Hrsg. Landesdenkmalamt Baden-Württemberg, Stuttgart 1990².
- Engelmann, Horst, Anwendung von Dichtungsschlammten, in Bausubstanz 7/8, 2000.
- Fensterbusch, Curt, Vitruv, De architectura libri decem = Zehn Bücher über Architektur, übersetzt und mit Anmerkungen versehen, Darmstadt 1976, S. 105: Liber secundus, Kapitel VIII.
- Fiches, Jean-Luc, Paillet, Jean-Louis, Nîmes, in: Die Wasserversorgung antiker Städte 3, Mainz 1988, Bildanhang: Beispiele antiker Wasserversorgungsanlagen.
- Finke, Manfred, Knüppel, Robert, Mai, Klaus, Büning, Ulrich, Historische Häuser in Lübeck, Lübeck 1989.
- Fitzner, Bernd, Heinrichs, Kurt, Kownatzki, Ralf, Weathering forms at natural stone monuments – classification, mapping and evaluation, in: Bauinstandsetzen, 3.Jahrgang, 2/1997, S. 105–124 (Verwitterungsformen an Natursteinbauwerken -Klassifizierung, Kartierung und Auswertung. Das Verfahren beruht auf der Dissertation von R. Kownatzki, Verwitterungszustandserfassung von Natursteinbauwerken unter besonderer Berücksichtigung phänomenologischer Verfahren, Diss. RWTH Aachen 1990.).
- Fleischmann, Peter, Das Bauhandwerk in Nürnberg vom 14. bis zum 18. Jahrhundert, in: Nürnberger Werkstücke zur Stadt- und Landesgeschichte, Bd. 38, hrsg. von R. Endres, G. Hirschmann und K. Ulshöfer, Schriftenreihe des Stadtarchivs Nürnberg 1985.
- Frick/Knöll/Neumann, Baukonstruktionslehre, Teil 1, Stuttgart 1975²⁶.
- Frössel, Frank, Lehrbuch der Kellerabdichtung und -sanierung. Expert-Verlag Renningen 2009³.
- Grimm, Wolf-Dieter, Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland, Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, Bd. 50, München 1990.
- Gruben, Gottfried, Griechische Tempel und Heiligtümer. 5. völlig überarbeitete und erweiterte Auflage, Hirmer, München 2001.
- Habermann, Hans, Fassadenwäsche am Regensburger Dom, in: Stein 1/1991, Sonderdruck ohne Seitenangabe, herausgegeben von Dr. Hartmann, Kulba – Bauchemie, Ansbach.
- Hegner, Hans-Dieter, Die Energieeinsparverordnung – das neue Instrument und seine Auswirkungen auf die Sanierungspraxis, Referat 2 anlässlich des 14. BAKA-Kongresses für Altbaerneuerung am 30.10.2000 in Nürnberg. Tagungsband.
- Heidbrede, Wilhelm, Sensible Selbstverständlichkeit? Fassadenreinigung und sachgerechte Schmutzwasserentsorgung, in: Der Maler & Lackierermeister, 3/2001, S. 18–21.
- Heinz, Werner, Römische Thermen, Badewesen und Badeluxus im Römischen Reich, München 1983.
- Hertlein, Beata, Kurzbericht über die Ergebnisse der Bauforschung im fünften Joch des südlichen Seitenschiffes sowie weitere Beobachtungen zur Baugeschichte der Klosterkirche in Ebrach, Bamberg 1994. Staatl. Hochbauamt Bamberg, Reponierte Registratur.
- Hettmann, Dietmar, Mechanische, chemische und elektroosmotische Trockenlegungsmaßnahmen, Vorträge im Rahmen von Seminaren zum Thema „Mauerwerksinstandsetzung“ bei der Landesgewerbeanstalt LGA Nürnberg, 1993 und 1994.

- Hettmann, Dietmar, Erkenntnisse und Erfahrungen mit Mauerwerksinjektionen, in: Bautenschutz + Bausanierung 16/1993, S. 84–87.
- Hettmann, Dietmar, Zur Beeinflussung des Feuchte- und Salzgehaltes in Mauerwerk, in: Bautenschutz + Bausanierung 16/1993, S. 72–75.
- Hölzen, Franz Josef, Bauwerksabdichtung im Bestand nach der neuen DIN 18195–Abdichten von Gebäuden Teil 2, in: Bausubstanz Heft 5/2000.
- Hoffmann-Axthelm, Dieter, Der Mauerziegel: Eine Faszination und ihr Objekt, in: 84 Arch⁺, März 1986, S. 58–61.
- Irmschler, Hans-Jörg, Schubert, Peter, Mauerwerkskalender 2000, Berlin 1999.
- Jakob-Rost, Liane, Das Vorderasiatische Museum, Staatl. Museen zu Berlin, Berlin 1987.
- Kabrede, Hans-Axel, Nachträgliches Abdichten erdberührter Bauteile, in: Bauinstandsetzen 4/1998, 125–138.
- Kabrede, Hans-Axel, Nachträgliches Abdichten durch Flächen-/Schleierinjektionen, in: Bausubstanz 8/2000.
- Kamphausen, Peter-Andreas, „Stand der Technik“ oder „anerkannte Regel der Technik“? Beispieldiskussion: Bauwerksabdichtungen nach der neuen DIN 18195 in: Deutsches Architektenblatt DAB 2/2000, S. 187.
- Kiesow, Gottfried, Romanik in Hessen, Stuttgart 1984.
- Klinkott, Manfred, Becks, Ralf, Wehrmauern, Türme und Tore, in: Troja – Traum und Wirklichkeit, Begleitband zur Ausstellung, Darmstadt 2001, S. 408.
- Koenigs, Wolf, Die Echohalle. Deutsches Archäologisches Institut Berlin, de Gruyter 1984, S. 95 ff.
- Kownatzki, R., Verwitterungszustandserfassung von Natursteinbauwerken unter besonderer Berücksichtigung phänomenologischer Verfahren, Diss. RWTH Aachen 1990.
- Kraus, Theodor, Das römische Weltreich, Propyläen-Kunstgeschichte Bd. 2, Sonderausgabe Berlin 1990.
- Kruse, Karl Bernhard, Kleines Glossar zur Geschichte der Herstellung und Verwendung von Backsteinen, in: 84 Arch⁺, März 1986.
- Künzel, Hartwig M., Kritische Grenzen für die Raumluftfeuchte in Gebäuden, in: Künzel, H.: Fensterlüftung und Raumklima: Grundlagen, Ausführungshinweise, Rechtsfragen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2006, pp. 227–229.
- Künzel, Hartwig M., Feuchteschutzaspekte bei Wärmedämmmaßnahmen, in: Begleitband zu 1. WTA-Sachverständigentag der regionalen Gruppe WTA-D, EnEV 2007 und Bestand, Weimar (Bauhaus-Universität) 22.11.2007, München 2007.
- Künzel, Hartwig M., Sedlbauer, K., Krus, M., Holm, A., Erläuterung der angewandten hydrothermischen Rechenverfahren; In: Künzel, H.: Fensterlüftung und Raumklima: Grundlagen, Ausführungshinweise, Rechtsfragen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2006, pp. 196–202.
- Laible, Ulrike, Bauen für die Kirche, Der Architekt Michael Kurz 1876–1957, hrsg. vom Architekturmuseum Schwaben, Dietrich Reimer Verlag Berlin 2003.
- Lamprecht, Heinz-Otto, Opus Caementitium – Bautechnik der Römer, Beton-Verlag, Düsseldorf 1987.
- Lamprecht, Heinz-Otto, Bau- und Materialtechnik bei antiken Wasserversorgungsanlagen, in: Die Wasserversorgung antiker Städte, Bd. 3, Geschichte der Wasserversorgung, Hrsg. Frontinus-Gesellschaft e. V., Mainz 1988.
- Lamprecht, Heinz-Otto, Wasser und Abwasser in der römischen Antike, in: Aus der Geschichte der Bautechnik, Bd. 2, *Fritz Scheidegger* (Hrsg.), Basel, Boston, Berlin 1992.
- Ludwig, Thomas, Das romanische Haus in Seligenstadt, Stuttgart 1987.
- Maier, Josef, Historische Steinbautechniken, in: Bauhandwerk, Heft 10, Oktober 1989, S. 549–552.
- Maier, Josef, Historische Steinbautechniken, in: Bauhandwerk, Heft 11, November 1989, S. 621–624.
- Maier, Josef, Altstadtsanierung Ansbach – Dokumentation der Stadterneuerung – Beiträge zur Stadtbaugeschichte, Ansbach 1986.

- Maier, Josef, Johann David Steingruber, 1702–1787, Leben und Werk, Gedenkausstellung anlässlich des 200. Todestages des Markgräflichen Hofbaumeisters in Ansbach vom 29.10. bis 6.12.1987, veranstaltet vom Landbauamt Ansbach mit dem Haus der bayerischen Geschichte und dem Historischen Verein für Mittelfranken, Katalog Ansbach 1987.
- Maier, Josef, Evang.-Luth. Pfarrkirche St. Georg zu Weidenbach – Untersuchung der historischen Quellen, masch. Gutachten für das Landbauamt Ansbach 1991.
- Maier, Josef, Die Kutschenremise in Bamberg, masch. Gutachten für das Landbauamt Bamberg 1991.
- Maier, Josef, Evangelisch-Lutherische Kirche St. Bartholomäus in Oberdachstetten, Untersuchungen anhand historischer Quellen, in: 96. Jahrbuch des Historischen Vereins für Mittelfranken 1992/93, S. 111–142.
- Maier, Josef, Alte Polizei, masch. Gutachten für das Stadtbauamt Pegau/Sachsen 1993.
- Maier, Josef, Bauwerksdiagnostik – Grundlage für erfolgreiches Sanieren, in: das bauzentrum Heft 7/1993, S. 28–37.
- Maier, Josef, Schloßbergmuseum in Chemnitz, masch. Gutachten zu Sanierputzschäden 1993.
- Maier, Josef, Untersuchung und Dokumentation der Bausubstanz der Dominikanerkirche in Bamberg, maschinengeschriebenes Gutachten für das Landbauamt Bamberg 1994.
- Maier, Josef, Geschichte des Backsteinmauerwerks, in: Das Mauerwerk, Heft 3, August 1999, S. 133–139.
- Maier, Josef, Schimmelpilzbildung in den Wohnungen Karakuyu und Hettler, Erlangen, Nürnberger Str. 102, masch. Gutachten 2005.
- Maier, Josef, Residenzschloss Ansbach, Gestalt und Ausstattung im Wandel der Zeit, Erlangen 2005.
- Maier, Josef, Putz und Stuck, Materialien – Anwendungstechniken – Restaurierung, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2007.
- Maier, Josef, Bauwerksdiagnostik, Entscheidungshilfen für die Vorbereitung einer Bauwerksinstandsetzung, TAE Kontakt & Studium Bd. 698, Hg. Prof. Dr.Ing. Dr.h.c. Wilfried J. Bartz, Dipl.Ing. Hans-Joachim Mesenholl, Dipl. Ing. Elmar Wippler, expert verlag Renningen 2010.
- Maier, Josef, Entwicklung des Mauerwerksbaus – Leitfaden für praktische Anwender, in: Mauerwerkkalender, Hrsg. von Wolfram Jäger, 34. Jg., Ernst & Sohn Berlin 2009.
- Maier, Josef, Wärmebrücken bei der Altbausanierung, in: Bausubstanz, Fraunhofer IRB Verlag Nr.1 Stuttgart 2011, S. 42–47.
- Maier, Josef, Energetische Sanierung von Altbauten, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2011².
- Mayer, G., Kováčová, D., Wittmann, Folker H., Feuchtigkeits- und Salztransport in Mauerwerk und Sanierputz, in: Bauinstandsetzen, 1. Jahrgang, 5/1995, S. 509–524.
- Meier, Hermann G., Sanierputze, ein wichtiger Bestandteil der Bauwerksinstandsetzung, Baupraxis + Dokumentation Bd.18, Renningen 2002².
- Mielke, Friedrich, Das Bürgerhaus in Potsdam, Textteil, in: Das Deutsche Bürgerhaus, begründet von Adolf Bernt, hrsg. von Günther Binding, Verlag Ernst Wasmuth, Tübingen 1972.
- Mislín, Miron, Geschichte der Baukonstruktion und Bautechnik – Von der Antike bis zur Neuzeit – Eine Einführung, Düsseldorf 1988.
- Müller, Werner, Grundlagen gotischer Bautechnik – *ars sine scientia nihil* – München 1990.
- Nägele, Erich, Rolle von Salzen bei der Verwitterung von mineralischen Baustoffen, WTA-Schriftenreihe Heft 1, Hrsg. von Folker H. Wittmann, München 1992.
- Nash, Ernest, Pictorial Dictionary of ancient Rome, revised Edition, Volume I, London 1968.
- Nash, Ernest, Pictorial Dictionary of ancient Rome, revised Edition, Volume II, London 1968.
- Nadoushani, Mohammad, Sanierung historischer Bauwerke aus Naturstein, Ratschläge zur Beurteilung und Behebung von Schäden, Wiesbaden/Berlin 1992.
- Noack, Walter, Ziegellexikon, München 1992.
- Opderbecke, Adolf, Der Maurer. Handbuch des Bautechnikers hrsg. von Hans Issel, Bd.II, Leipzig 1910⁴.
- Petry, Betonwerkstein und künstlerische Behandlung des Betons, Entwicklung von den ersten Anfängen der deutschen Kunststein-Industrie bis zur werksteinmäßigen Bearbeitung des Betons, i. A. des Deutschen Beton-Vereins, München 1913.

- Peschken, Goerd, Klünner, Hans-Werner, Das Berliner Schloß, Frankfurt a. M./Berlin 1991².
- Richter, Reinhard, Einfache Architektur-Photogrammetrie, Verfahren, Hilfsmittel, Rechentechniken, ein Leitfaden mit Programmhinweisen, Braunschweig 1990.
- Richtlinien für Planung und Ausführung von Abdichtungen erdberührter Bauteile mit kunststoffmodifizierten Bitumendickbeschichtungen, 1997.
- Richtlinien für Planung und Ausführung von Abdichtungen erdberührter Bauteile mit flexiblen Dichtungsschlämmen, 1999.
- Rieckhoff-Pauli, Sabine, Castra Regina, Regensburg zur Römerzeit, Katalog zur Jubiläumsausstellung 1979, Regensburg, 1979.
- Scheidegger, Fritz, Gips- das älteste Bindemittel? In: Aus der Geschichte der Bautechnik, Bd. 1, Fritz Scheidegger (Hrsg.), Basel, Boston, Berlin 1994², S. 68–70.
- Schmidt, Hartwig, Archäologische Denkmäler in Deutschland, rekonstruiert und wiederaufgebaut, Stuttgart 2000.
- Schmidt, Wolf, Das Raumbuch, Arbeitsheft 44 des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, Hrsg. von Michael Petzet, München 1989.
- Schmitt, Heinrich, Heene, Andreas, Hochbaukonstruktion, Die Bauteile und das Baugefüge, Grundlagen des heutigen Bauens, Braunschweig/Wiesbaden 1993¹².
- Schober, G. H.S., Kort, M., von Balen, K., von Bronswijk, J.E.M.H., Biologische Angriffe auf Mauerwerk, in: Bauinstandsetzen, 1. Jahrgang, 3/1995, S. 193–209.
- Scholz, Wilhelm, Knoblauch, Harald, Baustoffkenntnis, hrsg. von Wolfram Hiese unter Mitarbeit vieler anderer Gelehrter, Düsseldorf 1999¹⁴.
- Schubert, Peter, [Hrsg.] Das Mauerwerk, Zeitschrift für Technik & Architektur, Berlin 1. Jahrgang 1997–5. Jahrgang 2001, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen.
- Schuhmacher, Fritz, Das Wesen des neuzeitlichen Backsteinbaues, München 1920, Nachdruck 1985.
- Schuller, Manfred, Bauforschung, in: Der Dom zu Regensburg – Ausgrabung – Restaurierung – Forschung, Begleitband zur Ausstellung anlässlich der Beendigung der Innenrestaurierung des Regensburger Domes 1984–1988, Kunstsammlungen des Bistums Regensburg: Kunstsammlungen und Schriften Bd. 8, München-Zürich 1989.
- Sedlmeyer, Hans, Die Entstehung der Kathedrale, Photomechanischer Nachdruck mit einem Vorwort von Bernhard Rupprecht, Graz 1988.
- Snethlage, [Hrsg.] Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm „Steinzerfall – Steinkonservierung“, Berlin (1991)1993, S. 261–282.
- Staatsarchiv Nürnberg, Regierung von Mittelfranken, Kammer des Inneren, Abgabe 1952, Nr. 6355, fol. 166.
- Andernach, A. W., Brief an das Königliche Landbauamt Windsheim vom 8.Juli 1904. Staatliches Hochbauamt Ansbach, Reponierte Registratur, Abt. Windsheim.
- Ullrich, M., Aspekte der Tragwerksplanung bei der Instandsetzung alter Bausubstanz, in: Bauinstandsetzen, 2. Jahrgang, 6/1996, S. 531–550.
- Van Hees, Rob P.J., Naldini, Silvia, The Masonry Damage Diagnostic System, in: Bauinstandsetzen, 1. Jahrgang, 6/1995, S. 461–473.
- Venderickx, Kathleen, Van Gemert, Dionys, Geo-Electrical Survey of Masonry for Restoration Projects, [Anwendung einer geo-elektrischen Untersuchungsmethode für Mauerwerk im Rahmen eines Instandsetzungsvorhabens] in: Bauinstandsetzen, 6. Jahrgang, Heft 2/2000, S. 151–172.
- Venzmer, Helmuth, [Hrsg.] Praxishandbuch Mauerwerkssanierung von A-Z, Berlin 2001.
- Vierl, Peter, Putz und Stuck, Herstellen – Restaurieren, München 1987².
- Volhard, Franz, Röhlen, Ulrich, Lehmbau Regeln – Begriffe, Baustoffe, Bauteile – [Hrsg.] Dachverband Lehm, Weimar/Wiesbaden 1999.
- Wachsmuth, Friedrich, Die islamischen Backsteinformen der Profanbauten im Irak, Berlin 1916.
- Warscheid, TH., Einflüsse mikrobieller Biofilme bei der Zerstörung anorganischer Baumaterialien und ihre Bedeutung für die konservatorische Praxis, in: Bauinstandsetzen, 2. Jahrgang, 6/1996, 493–503.

- Weber, Helmut, Steinkonservierung, Der Leitfaden zur Konservierung und Restaurierung von Natursteinen, Kontakt & Studium Bd. 59, Sindelfingen 1985³.
- Weber, Helmut, Fassadenschutz und Bausanierung. Der Leitfaden für die Sanierung, Konservierung und Restaurierung von Gebäuden, Kontakt & Studium Bd. 40, Ehningen bei Böblingen 1986³.
- Weber, Helmut, Mauerfeuchtigkeit, Ursachen und Gegenmaßnahmen, Kontakt & Studium Bd. 137, Ehningen bei Böblingen 1988³.
- Weber, Helmut, Instandsetzung gerissener Putze an Fassaden I, in: Bauhandwerk 3/1996, S. 51–56.
- Weber, Helmut, Instandsetzung gerissener Putze an Fassaden II, in: Bauhandwerk 4/96, S. 41–44.
- Weber, Helmut, 20 Jahre Sanierputze im Langzeiteinsatz – ein Erfahrungsbericht, in: Bauinstandsetzen 6/1996, S. 551–565.
- Weber, Helmut, Injektionsverfahren gegen kapillar aufsteigende Feuchtigkeit, in: Bauinstandsetzen 5/1997, S. 487–514.
- Weber, Helmut, Mehlgeld, sandend, bewittert – Anstriche als Beschichtungen für Bauwerke aus Naturstein, in: Der Maler & Lackierermeister 3/1999 S. 196–201.
- Weber, Helmut, Richtlinien und Normen, Abdichtung von Gebäuden, Teil 1, in: Bausubstanz 4/2000.
- Weber, Helmut, Gollwitzer, Leonhard, Untersuchungsbericht Wohnhaus in Schkeuditz Schillerstr. 10, masch. Gutachten München 1995.
- Weber, Jürgen, Hafkesbrink, Volker, [Hrsg] Bauwerksabdichtung in der Altbau sanierung, Verfahren und juristische Betrachtungsweise, Wiesbaden 2008².
- Wehlte, Kurt, Werkstoffe und Techniken der Malerei, Ravensburg 1985⁵.
- Wenzel, Fritz, Bauwerksdiagnostik. Beurteilen des Tragverhaltens bei historischem Mauerwerk, Dokumentation des Expertentreffens im Rahmen des WTZ-Abkommens Universität Karlsruhe 1989, Sonderheft des SFB 315, Karlsruhe 1990.
- Wenzel, Fritz, Untersuchungen an Material und Konstruktion historischer Bauwerke, Arbeitsheft 10 des SFB 315, Karlsruhe 1991.
- Wenzel, Fritz, Gigla, Birger, Kahle, Martin, Stiesch, Gerhard mit Beiträgen von Ralph Egermann, Gabi Patitz, Claudia Neuwald-Burg, Ahmad Sabha, und einer denkmalpflegerischen Bewertung von Hannes Eckert, Historisches Mauerwerk, Untersuchen, Bewerten und Instandsetzen, in: Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, Baugefüge, Konstruktionen, Werkstoffe, Schriften des Sonderforschungsbereichs 315 der Universität Karlsruhe, Hrsg. von Fritz Wenzel und Joachim Kleinmanns, Karlsruhe 2000.
- Wiesinger, Lieselotte, Das Berliner Schloss, von der kurfürstlichen Residenz zum Königsschloss, Darmstadt 1989.
- Wittmann, H. Folker, Feuchtigkeitsaufnahme und Feuchtigkeitstransport in porösen Baustoffen, in: Helmut Weber, Fassadenschutz und Bausanierung. Der Leitfaden für die Sanierung, Konservierung und Restaurierung von Gebäuden, Kontakt & Studium Bd. 40, Ehningen bei Böblingen 1986³, S. 49–71.
- Wittmann, H. Folker, Über unwirksame Verfahren gegen aufsteigende Feuchtigkeit, in: Bauinstandsetzen 4/1995 S. 329 bis 335.
- Wohlmayr, Wolfgang, Die römische Kunst – Ein Handbuch. Wissenschaftliche Buchgesellschaft WBG Darmstadt 2011.
- WTA-Merkblätter der Wissenschaftlich-Technischen Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e. V., München.
- WTA-Merkblatt 3–4-90/D: Natursteinrestaurierung nach WTA – Kenndatenermittlung und Qualitätssicherung bei der Restaurierung von Natursteinbauwerken.
- WTA-Merkblatt 2–2-91/D: Sanierputzsysteme.
- WTA-Merkblatt 3–8-95: Handwerklicher Steinaustausch.
- WTA-Merkblatt 3–9-95/D: Bewertung von gereinigten Werkstein-Oberflächen.
- WTA-Merkblatt 4–4-96: Mauerwerksinjektion gegen kapillare Feuchtigkeit.
- WTA-Merkblatt 3–10-97/D: Natursteinrestaurierung nach WTA – Zustands- und Materialkataster an Natursteinbauwerken.
- WTA-Merkblatt 4–3-98/D: Instandsetzen von Mauerwerk – Standsicherheit/ Tragfähigkeit.

- WTA-Merkblatt 3–5-98/D: Natursteinrestaurierung nach WTA – Reinigung I.
- WTA-Merkblatt 4–6-98/D: Nachträgliches Abdichten erdberührter Bauteile.
- WTA-Merkblatt 4–5-99/D: Beurteilung von Mauerwerk – Mauerwerksdiagnostik, [Hrsg.] Referat Mauerwerk der Wissenschaftlich-Technischen Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e. V. unter Mitarbeit von E. Alexakis, M. Cromm, J. Deppen, H. Groeger, G. Jahnke, W. Krämer, J. Maier, R. Schäfer, H. Schuh und R. Zimbelmann, Zürich 1999.
- WTA-Merkblatt 6–2-01/D: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse.
- WTA-Merkblatt E-2-04-07/D: Beurteilung und Instandsetzung gerissener Putze an Fassaden.
- Ziegel-Bauberatung, technische Informationen, Planungsmappe, Ergänzungslieferung 1994, Teil 1.1: Mauerziegel nach DIN 105, Hrsg. vom Ziegelforum e. V. München 1994, Ergänzungslieferung 1998.

Normen und Regelwerke

- ATV-DVWK – M 370– Abwasser und Abfälle aus der Reinigung und Entschichtung von Fassaden. Gesetz zum Schutz vor gefährlichen Stoffen – ChemG – Chemikaliengesetz. Fassung vom 20. Juni 2002 (BGBl. Teil I Nr. 40 vom 27.06.2002).
- Technischen Regeln für Gefahrstoffe, Ausgabe Dezember 2006. Aufgestellt vom Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS).
- Landesgesundheitsamt Baden-Württemberg LGA, Handlungsempfehlung für die Sanierung von mit Schimmelpilzen befallenen Innenräumen, Stuttgart 2004.
- UBA – Leitfaden zur Ursachensuche und Sanierung bei Schimmelpilzwachstum in Innenräumen, Hrsg. Umweltbundesamt – Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes, Dessau 2005.
- DIN-Normen, Beuth-Verlag, Berlin.
- DIN 105–5, Ausgabe: Mai 1984, Mauerziegel; Leichtlanglochziegel und Leichtlangloch-Ziegelplatten.
- E DIN 105–5, Ausgabe: April 2011, Mauerziegel – Teil 5: Leichtlanglochziegel und Leichtlanglochziegelplatten.
- DIN V 105–6, Ausgabe: Juni 2002, Mauerziegel – Teil 6: Planziegel.
- DIN 105–100, Ausgabe: April 2011 Mauerziegel – Teil 100: Mauerziegel mit besonderen Eigenschaften.
- DIN V 106–1, Ausgabe: Februar 2003, Kalksandsteine; Voll-, Loch-, Block-, Hohlblöcke-, Platten, Planelemente, Fasensteine, Bauplatten, Formsteine.
- DIN V 106–2, Ausgabe: Februar 2003, Kalksandsteine; Vormauersteine und Verblender.
- DIN 488–1, Ausgabe: August 2009, Betonstahl – Teil 1: Stahlsorten, Eigenschaften, Kennzeichnung – Maße und Gewichte.
- DIN 488–2, Ausgabe: August 2009, Betonstahl – Betonstabstahl.
- DIN 1045–1, Ausgabe: August 2008. Tragwerke aus Beton und Stahlbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion.
- DIN 1053–1, Ausgabe: November 1974, Mauerwerk; Rezeptmauerwerk; Berechnung und Ausführung.
- DIN 1060, Ausgabe: Juli 1955, Baukalk.
- DIN 1164–1, Ausgabe: Mai 1995, Zement; Zusammensetzung, Anforderungen.
- DIN 4095, Ausgabe: Juli 2007. Baugrund; Dränung zum Schutz baulicher Anlagen; Planung, Bemessung und Ausführung.
- DIN 4102–1, Ausgabe: Mai 1998. Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Teil 1: Baustoffe, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen.
- DIN 4108–1, Ausgabe: August 1981. Wärmeschutz im Hochbau; Größen und Einheiten.
- DIN 4108–2, Ausgabe: Juli 2003. Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.

- DIN 4108–3, Ausgabe: Juli 2001. Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz; Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung.
- DIN 4108–3 Berichtigung 1, Ausgabe: April 2002. Berichtigungen zu DIN 4108–3 vom Juli 2001.
- DIN V 4108–4, Ausgabe: Juni 2007. Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte.
- DIN 4108 Beiblatt 2, Ausgabe: Januar 2004. Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Wärmebrücken – Planungs- und Ausführungsbeispiele.
- DIN V 4108–6, Ausgabe: Juni 2003. Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs.
- DIN V 4108–6 Berichtigung 1, Ausgabe: März 2004. Berichtigungen zu DIN V 4108–6 vom Juni 2003.
- DIN 4108–7, Ausgabe: Januar 2011– Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden – Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie –beispiele.
- DIN 4108–10, Ausgabe: Juni 2008. Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe – Werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe.
- DIN 4109, Ausgabe: Oktober 2006. Schallschutz im Hochbau; Anforderungen und Nachweise, Berlin 2006.
- DIN 4109, Beiblatt 1/A1, Ausgabe: September 2003. Schallschutz im Hochbau – Ausführungsbeispiele und Rechenverfahren; Änderung A1 Berlin 2003.
- DIN 4109, Änderung A1. Beiblatt 2, Ausgabe: Februar 2010. Hinweise für Planung und Ausführung; Vorschläge für einen erhöhten Schallschutz; Berlin 2010.
- DIN 4109, Beiblatt 3, Ausgabe: Juni 1996. Schallschutz im Hochbau – Berechnung von R'w, R für den Nachweis der Eignung nach DIN 4109 aus Werten des im Labor ermittelten Schalldämmmaßes R_w. Berlin 1996.
- DIN 4109–11, Ausgabe: Mai 2010. Schallschutz im Hochbau – Teil 11: Nachweis des Schallschutzes; Güte- und Eignungsprüfung (Norm-Entwurf), Berlin 2010.
- DIN 4095, Ausgabe: Juni 1990, Baugrund; Dränung zum Schutz baulicher Anlagen; Planung, Bemessung und Ausführung.
- DIN 4123, Ausgabe: Mai 2011, Ausschachtungen, Gründungen und Unterfangungen im Bereich bestehender Gebäude, Berlin 2011 (Diese Norm gilt für Ausschachtungen und Gründungsarbeiten neben bestehenden Gebäuden sowie für die herkömmliche Unterfangung von Gebäudeteilen in schmalen Streifen mit Mauerwerk, Beton oder Stahlbeton. Sie gibt an, wie diese Arbeiten so durchgeführt werden können, dass Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der bestehenden Gebäude erhalten bleiben, und welche Nachweise dafür erbracht werden müssen. Für diese Norm ist das Gremium NA 005–05–14 AA „Unterfangungsarbeiten“ im DIN zuständig.).
- DIN 4165, Ausgabe: Februar 1959. Wandbausteine aus dampfgehärtetem Gasbeton und Schaumbeton (Porenbetonsteine).
- DIN V 4165 -100, Ausgabe: Mai 2010. Porenbetonsteine – Teil 100: Plansteine und Planelemente mit besonderen Eigenschaften, Berlin 2010.
- DIN 16 945, Ausgabe: März 1989, Reaktionsharze, Reaktionsmittel und Reaktionsharzmassen; Prüfverfahren.
- DIN 17 007–4, Ausgabe: Juli 1963, Werkstoffnummern; Systematik der Hauptgruppen 2 und 3: Nichteisenmetalle.
- DIN 18 151, Ausgabe: Juli 1960. Hohlblocksteine aus Leichtbeton, Berlin 1960.
- DIN 18 151, Ausgabe: Oktober 2005. Hohlblocksteine aus Leichtbeton, Berlin 2005.
- DIN 18 190, Ausgabe: Oktober 1992. Dichtungsbahnen für Bauwerksabdichtungen; Dichtungsbahnen mit Metallbandeinlage; Begriff, Bezeichnung, Anforderungen, Berlin 1992.
- DIN 18 195, Ausgabe: August 2000. Teil 1–10, Bauwerksabdichtungen, Berlin 2000–2011.
- DIN V 18 500, Ausgabe: Dezember 2006. Betonwerkstein; Begriffe, Anforderungen, Prüfung, Überwachung, Berlin 2006.

- DIN V 18 550–2, Ausgabe: April 2005. Putz und Putzsysteme – Ausführung, Berlin 2005.
- DIN 18 550–3, Ausgabe: März 1991. Putz; Wärmedämmputzsysteme aus Mörteln mit mineralischen Bindemitteln und expandiertem Polystyrol (EPS) als Zuschlag, Berlin 1991.
- DIN 18 557 Werkmörtel; Herstellung Überwachung und Lieferung (nicht mehr gültig).
- DIN V 18 952–1, Ausgabe: Mai 1956. Lehmbau/Baulehm; Begriffe, Arten, Berlin 1956.
- DIN V 18 952–2, Bl.1 Ausgabe: Mai 1956, Bl.2 Oktober 1956. Lehmbau/Baulehm; Prüfung Baulehm, Berlin 1956.
- DIN V 18 953, Ausgabe: Mai 1956, Baulehm, Lehmbauteile: Bl.1 Verwendung von Baulehm, Bl.2 Gemauerte Lehmwände, Bl.3 Gestampfte Lehmwände, Bl.4 Gewellerte Lehmwände, Bl.5 Leichtlehmwände in Gerippebauten, Bl. 56 Lehmfußböden, Berlin 1956.
- DIN 51 043, Ausgabe: August 1979. Trass; Anforderungen, Prüfung, Berlin 1979.
- DIN 52 617, Ausgabe: 1987. Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen.
- DIN EN 459–1, Ausgabe: 2001. Baukalk – Teil1: Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien, Berlin 2001.
- DIN EN 998–1, Ausgabe: Dezember 2010. Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau- Teil1: Putzmörtel, Berlin 2010 (Diesse Europäische Norm gilt für im Werk hergestellten Putzmörtel aus anorganischen Bindemitteln, die als Außenputz und als Innenputz für Wände, Decken, Pfeiler und Trennwände verwendet werden. Sie enthält Definitionen und Leistungsanforderungen.).
- DIN EN 10 080, Ausgabe: August 2005, Stahl für die Bewehrung von Beton – Schweißgeeigneter Betonstahl – Allgemeines; Schweißgeeigneter gerippter Betonstahl B 500.
- DIN EN 10 088–1, Ausgabe: 2005, Nichtrostende Stähle – Teil 1: Verzeichnis der nichtrostenden Stähle.
- DIN EN ISO 10 211–1 und 2, Ausgabe: April 2008. Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Detaillierte Berechnungen. Berlin 2008.
- DIN EN 12 326–1, Ausgabe: Oktober 2004. Schiefer und andere Natursteinprodukte für überlappende Dachdeckungen und Außenwandbekleidungen – Teil 1: Produktspezifikation, Teil 2: Prüfverfahren für Schiefer und carbonathaltige Schiefer; Berlin 2004.
- DIN EN 13 501–6, (Norm-Entwurf) Ausgabe: November 2011, Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten.
- DIN EN ISO 13 788, (Norm-Entwurf) Ausgabe: Juni 2011. Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren, Berlin 2011.
- DIN EN 13 829, Ausgabe: Februar 2001, Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden – Differenzdruckverfahren (ISO 9972:1996, modifiziert).
- DIN EN 15 026, Ausgabe: Juli 2007, Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation.
- VDI-Richtlinie 3798–1, Ausgabe: Dezember 1989, überprüft und bestätigt im März 2003– Untersuchung und Behandlung von immissionsgeschädigten Werkstoffen, insbesondere bei kulturhistorischen Objekten, VDI-Verlag, Düsseldorf 1989 (2003).
- VDI-Richtlinie 3798–2, Ausgabe: Dezember 1997, Untersuchung und Behandlung von immissionsgeschädigten Werkstoffen, insbesondere bei kulturhistorischen Objekten – Anleitung zur Dokumentation, VDI-Verlag, Düsseldorf 1997.
- VDI-Richtlinie 3798–3, Ausgabe: Dezember 1998, Untersuchung und Behandlung von immissionsgeschädigten Werkstoffen, insbesondere bei kulturhistorischen Objekten – Die graphische Dokumentation, VDI-Verlag, Düsseldorf 1998.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Kirche von Oberdachstetten. Zeichnung der Westseite mit Eintragung der Risse durch Bauinspektor Schuster vom Dezember 1839 (Staatsarchiv Nürnberg)	2
Abb. 1.2	Ansbach. Freigelegte mittelalterliche Stadtmauer innerhalb eines modernen Ladens instandgesetzt und dadurch erhalten	6
Abb. 1.3	Berlin, Vorderasiatisches Museum. Löwe aus der Stadtmauer von Babylon, 6. Jahrhundert v. Chr.	6
Abb. 2.1	Mauern des antiken Mykene, Ende 2. Jahrtausend v. Chr.	10
Abb. 2.2	Delphi, Apollontempel – Umfassungsmauer des 6. Jahrhunderts v. Chr. Das Fugenbild ordnet sich radial um je einen zentralen Stein	11
Abb. 2.3	Mykene, Löwentor	12
Abb. 2.4	Italien, Vetulonia. Etruskisches Kammergrab mit einem Kraggewölbe	13
Abb. 2.5	Oberdachstetten, Stützmauer am Kirchhof. Die aus Trockenmauerwerk geschichteten Stützpfeiler können dem Erddruck nicht gänzlich standhalten. Sie stellen sich schief, Steine fallen heraus.	14
Abb. 2.6	Altgriechisches Mauerwerk aus passgenau zugerichteten rechteckigen Quadern mit eisernen Klammern versetzt und mit Blei ausgegossen	15
Abb. 2.7	Opus reticulatum mit seinem Fugennetz	16
Abb. 2.8	Opus incertum. Das Mauerwerk aus kleinformatigen Steinen wird an den Kanten mit großen Quadern gefasst	16
Abb. 2.9	Opus isodomum (<i>links</i>), pseudoisodomum (<i>rechts</i>).	17
Abb. 2.10	Opus implectum mit sog. Durchschüssen, das sind Steine, die gänzlich durch das Mauerwerk hindurchbinden. Oben griechisches, unten römisches implectum nach Vitruv. <i>a</i> =Außenschale, <i>b</i> =Durchschuss, <i>c</i> =Füllung	18
Abb. 2.11	Rom, Trajanssäule. Beginn des Krieges gegen die Daker	19
Abb. 2.12	Nizza, Römische Thermenmauern. Die zweischalige Kalksteinmauer wird in regelmäßigen Abständen durch Backsteinschichten abgeglichen.	20
Abb. 2.13	Barbegal, Südfrankreich. Römischer Beton am Aquaedukt, das Wasser zu den Mühlen leitet. Der Zuschlagstoff im	

opus caementitium wird zum wasserführenden Gerinne hin immer feiner, die Rotfärbung weist auf Ziegelbruchstücke und gemahlenen Backstein als hydraulische Zugabe hin.	20
Abb. 2.14 Bad Homburg, sog. Saalburg am Römischen Limes. Nach Befund rekonstruierter Verputz aus Kalkmörtel mit Quaderfugenmalerei.	21
Abb. 2.15 St. Gilles, Südfrankreich. Mittelalterliches Haus mit antikem Dekor	22
Abb. 2.16 Ronneburg/Hessen. Mittelalterliches Gewölbe über der Kellertreppe. Hier wurden die Steine in ein auf einer Schalung befindliches Mörtelbett gelegt. Nach dem Ausschalen war dann nur noch der fette Kalkmörtel zu sehen ..	23
Abb. 2.17 Fulda, Stadtmauer am Heertor. Deutlich ist das Mauerwerk im Fischgrätverband zu sehen	23
Abb. 2.18 Büdingen, Schloss. Im unteren Mauerbereich sind noch die Buckelquader vorhanden	24
Abb. 2.19 Mittelalterliche Darstellung eines Turmbaus mit folgenden typischen Maurerarbeiten: Quaderoberfläche kontrollieren, Mörtel mischen, Steine mit einem Behelfskran hochziehen, Mörtel schleppen, Quader passgenau versetzen.	26
Abb. 2.20 Paris, Sainte Chapelle. Die Außenwände wurden schier in diaphane, leuchtende Glasflächen aufgelöst	27
Abb. 2.21 Ansbach, Residenzschloss. Kellermauerwerk der Renaissance aus sehr genau zugehauenen Quadern.	28
Abb. 2.22 Ansbach, Hofkanzlei. Renaissance-Fassade mit Sgraffito- Putz an der Außenwand, der Quader vortäuschen soll.	28
Abb. 2.23 Ansbach, Residenzschloss. Barockes Mischmauerwerk aus Backsteinen und Sandsteinquader	29
Abb. 2.24 Büdingen, Stadtkirche. Der unregelmäßige Eckquader aus Sandstein wurde mit Farbe als großer, genau behauener Quader vorgetäuscht.	29
Abb. 2.25 Schwäbisch Hall. Steinquader wurden auf dem Putz mit malerischen Mitteln vorgetäuscht	30
Abb. 2.26 Erlangen, Apfelstr.2. Barockes Wohn- und Geschäftshaus aus dem Jahre 1699 mit verputzten Backsteinwänden und Sandsteinquadern am Tor im Erdgeschoss, verputztes Fachwerk in den Obergeschossen	31
Abb. 2.27 London, King's Cross Station. Farbige Lithographie, Mitte des 19. Jahrhunderts. Die historisierende Fassade des Bahnhofs verhüllt die Gusseisenkonstruktion des Gebäudes.	32
Abb. 2.28 Leipzig, Harnackstraße. Betonwerksteine in der Backsteinaußenwand	32
Abb. 2.29 Nürnberg, Kongresshalle. Granitplatten als Verkleidung der Backsteinaußenwände	33

Abb. 2.30	Berlin, Grenzmauer. Die Stadt wurde 40 Jahre lang durch eine Mauer aus Betonfertigteilen geteilt. Sie fiel am 9.11.1989. . .	34
Abb. 2.31	Rom, Basilica Aemilia. Gebälk, bestehend aus dreifach gegliederten Architrav, mit Ranken verziertem Fries und oben das Sima des Kranzgesimses.	35
Abb. 2.32	La Turbie, Tropaeum Alpium, Eingang umrahmt mit Architekturgliedern wie seitlichem Gewände, auskragendem Sturz, Auszugsfläche und einer Dreiecksverdachung	35
Abb. 2.33	Würzburg, Frauenkirche. Gotisches Portal mit Architekturdekor. Die Quader am rechten Stützpfeiler wurden überfasst und dadurch vergrößert und geschönt	36
Abb. 2.34	Rom, Pantheon. Der Innenraum besitzt eine Nischengliederung der aus Gussmörtel mit Travertin- und Tuffbruchstücken gegossenen Außenwände	37
Abb. 2.35	Ansbach, Residenzschloss. Hochbarocke Innenhoffassaden mit stockwerksweise angeordneter Blendarchitektur.	37
Abb. 2.36	Regensburg, Museum. Modell eines römischen Zimmers mit verschiedenen Formziegeln	39
Abb. 2.37	Trier, Römische Basilika, erbaut 310 n. Chr., modern wieder aufgebaut. Reiner Backsteinbau aus gebrannten Mauerziegeln	40
Abb. 2.38	Die aus Backsteinen errichteten Türme der Frauenkirche in München.	41
Abb. 2.39	Burg auf Fehmarn, Kirche. Mauerwerk mit Urhebermarken.	42
Abb. 2.40	Mittelalterliche Mauerverbände: <i>links</i> : Wilder Verband, <i>mitte</i> : Gotischer Verband, <i>rechts</i> : wendischer Verband	43
Abb. 2.41	Nürnberg, Mauthalle. Backstein- und Dachziegelformate des Mittelalters eingemeißelt in die Sandsteinwand	46
Abb. 2.42	Burg auf Fehmarn, Pfeiler in der Pfarrkirche. Selbst die Backsteinwände wurden mit Quadermalerei überfasst	47
Abb. 2.43	Lübeck, Marienkirche. Starke eiserne Maueranker im Backsteinmauerwerk der Kirchtürme.	48
Abb. 2.44	Lübeck, Burgtor. Glasierte und Formbacksteine schmücken die Mauer	48
Abb. 2.45	Berlin, Diakonissenkrankenhaus Bethanien. Diagonalfugen im Kreuzverband	49
Abb. 2.46	Berlin, St.Afra-Kirche. Weiße Putzflächen kontrastieren mit roten Backsteinen.	50
Abb. 2.47	Berlin, Kunstgewerbemuseum. Das rote Backsteinmauerwerk wurde mit reichem Dekor geschmückt, u. a. mit Terrakottaplatten und Mosaiken	50
Abb. 2.48	Pegau, Alte Polizei. Durch Ausbesserungen im Mauerwerk, die zu verschiedenen Zeiten notwendig geworden waren, kommen hier beinahe alle Backsteinformate vor.	53
Abb. 2.49	Mauerwerk aus porosierte Mauersteinen	53

Abb. 2.50	Schottersmühle/Oberfranken. Kellermauerwerk mit Lehmmörtel	54
Abb. 2.51	Briefpapier der Firma Andernach mit Angabe ihrer Produkte gegen Baufeuchtigkeit	55
Abb. 2.52	Leipzig, Harnackstr.3. Links sind die dunklen Diabassteine als Schutz gegen aufsteigende Feuchte vermauert. Darüber wurde mit Mauerziegeln die Kellerwand vollendet	56
Abb. 2.53	Belüftungsröhrchen nach Knapen, sog. Mauerlunge	57
Abb. 2.54	Lehmputz auf der Wand unter Kalkfarben	59
Abb. 2.55	Erlangen-Bruck. Mit Lehm ausgemauerte Fachwerkinnenwand	60
Abb. 2.56	Herbrechtingen, Bauernhaus. Die mit Lehm ausgefachte Fachwerkinnenwand macht die Schiefstellung klaglos mit	61
Abb. 2.57	Schiefer Turm von Pisa	62
Abb. 2.58	Ansbach, Marstall. Holzpfähle als Fundament. (Zeichnung nach Ing.-Büro Dr. Bergmann, München)	63
Abb. 2.59	Wohnhaus-Fundament aus dem Jahre 1698. Es ist nur etwa 60 cm hoch und wesentlich breiter als die Wohnhauswand	64
Abb. 2.60	Die nicht gegen Schub abgesicherte Wand des Getreidespeichers stürzte infolge des Aushubs für neue Fundamente im Nachbargebäude ein	65
Abb. 3.1	Burg auf Fehmarn, Pfarrkirche. Granitsockel	72
Abb. 3.2	Alsfeld. Wohnhauswand aus Basaltmauerwerk	74
Abb. 3.3	Würzburg, Rathaus. Die gesamte Altstadt besteht aus rotem Mainsandstein	76
Abb. 3.4	Nürnberg, Dürerhaus. Sandsteinerdgeschoss	76
Abb. 3.5	Limburg, Domburg. Häuser aus Kalksteinmauerwerk	79
Abb. 3.6	Ansbach, Residenzschloss. Barocke Treppe im Osteck aus Solnhofer Marmor	79
Abb. 3.7	Ansbach, Residenzschloss, Marmorkabinett. Der Sockel der Wand ist echter Marmor, die übrige Wand besteht aus Stuckmarmor	80
Abb. 3.8	Fulda, Dom, Seitenkapelle. Türmchen mit Schiefer gedeckt	80
Abb. 3.9	Ohne Regenschutz aufgestapelte Porotonsteine saugen schnell viel Wasser	84
Abb. 3.10	Leipzig, Endersstraße. Klinkerfassade mit Betonwerksteinen	85
Abb. 3.11	Betonformsteine werden zur Herstellung von Kaminen verwendet	86
Abb. 3.12	Kalksandsteinmauerwerk aus großformatigen Blöcken	87
Abb. 3.13	Kalzium-Kreislauf. (Quelle: www.hargarten-online.de, Stand Mai 2006)	90
Abb. 3.14	Flurgleicher Gipsbrennofen. (Skizze nach (Lucas))	99
Abb. 3.15	Unterfluriger Gipsbrennofen in der Gipshütte. (Skizze nach (Lucas))	99

Abb. 4.1	Gaststätte zur Schwane. Deutlich erkennt man die durch Regen und Oberflächenwasser in das Fassadenmauerwerk eingedrungene Feuchte.	102
Abb. 4.2	Schematische Darstellung unterschiedlicher Porenarten. <i>A</i> durchgehende Pore, Kapillare, <i>B</i> Sackpore, <i>C</i> geschlossene Pore, <i>D</i> Verzweigung, <i>E</i> Verbindung, <i>F</i> Flaschenhals. (Skizze nach Weber 1997 und Balak und Pech 2008)	102
Abb. 4.3	Der Sockel eines Kirchengebäudes wurde von einer Rabatte aus großen Kieseln gegen Spritzwasser geschützt	104
Abb. 4.4	Das schadhafte Regenfallrohr ist die Ursache für den Wasserschaden in der Wand	105
Abb. 4.5	Die verlinkerte Sockelzone bewirkt das Aufsteigen der Feuchte über sie hinauf. Sie lässt dabei bauschädliche Salze oberhalb der Klinker im Wandputz auskristallisieren.	105
Abb. 4.6	Die kapillar aufsteigende Feuchtigkeit verdunstet im Sockelbereich nach außen	106
Abb. 4.7	Die Kellerwand ist bis in Höhe des Haussockels feucht, oberhalb aber infolge Verdunstung nach innen trocken	107
Abb. 4.8	Benetzung einer hydrophilen und einer hydrophoben Oberfläche	109
Abb. 4.9	Wasser kondensiert auf einem nicht gedämmten Fenster in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit	110
Abb. 4.10	Die Außenwand wurde durch ein Gemenge von verschiedenen Feuchteaufnahme-Mechanismen total geschädigt. Dabei spielte die Hygroskopizität eine entscheidende Rolle	112
Abb. 4.11	Im Bereich der bodennahen Zone ist die Wand kälter, daher kondensiert Wasser und lässt mitgenommene Salze ausblühen	113
Abb. 5.1	Das Haus in der Altstadt von Erfurt zeigte 1990 beim ersten Hinsehen eine Fülle von Bauschäden	118
Abb. 5.2	Anstehendes Grundwasser wird in der Sondage gemessen und überprüft	119
Abb. 5.3	Orientierungssystem. (Nach Schmidt 1989)	119
Abb. 5.4	Melsungen, Bartenwetzerbrücke vor der Sanierung. Schäden bis ca. 5 mm Tiefe	120
Abb. 5.5	Die Sandsteine der Süd-West-Ecke der Alten Polizei in Pegau zeigten 1993 Schäden bis 40 mm Tiefe	121
Abb. 5.6	Das Sandstein-Fenstergewände zeigt eine starke Abscherbelung	122
Abb. 5.7	Die stark abgewitterten Sandsteine im Sockel der St. Gumbertuskirche in Ansbach	122
Abb. 5.8	Die Bindemittelauswaschung findet bereits nach wenigen Tagen statt, wenn das Mauerwerk nicht abgedeckt wird und Regenwasser eindringen kann	123

Abb. 5.9	Fulda, Schloss. 1989 wurden die Mauerflächen gereinigt, die Statuen auf den Mauern dagegen behielten ihre schwarzen Krusten	123
Abb. 5.10	Bewuchs des Strebewerk-Schwibbogens der St. Georgenkirche in Wismar vor der Sanierung	124
Abb. 5.11	Die feuchten Stellen an der Hauswand der Gaststätte zeigen sich als dunkle Flecken mit einem oberen, mäandrierenden Rand	124
Abb. 5.12	Schimmel in einer Außenwandecke	125
Abb. 5.13	Anstrich- und Putzabplatzungen im Haussockelbereich wegen auskristallisierender Salze	126
Abb. 5.14	Durchfeuchtete Kellerwände infolge einer fehlenden horizontalen Sperrsicht	127
Abb. 5.15	Die Außenwände der Altstadthäuser in Erfurt zeigten 1990 viele, auch hygroskopisch verursachte Mauerwerkschäden	128
Abb. 5.16	Defekte Dachrinnen und Regenfallrohre erzeugen gravierende Schäden im Mauerwerk	128
Abb. 5.17	Schimmel in der Fußbodenecke von Boden und Wand	129
Abb. 5.18	Ansbach, Marstall am Schloss. Fundament aus in den Grund eingetriebenen Stämmen	130
Abb. 5.19	Fulda, Propstei Johannesberg, Torbau. Die Fensterstürze waren infolge Setzung gebrochen. Inzwischen ist der Torbau saniert	131
Abb. 5.20	Schnaittach, Kalvarienberg, Kapellenwand. Die Risse folgen der Steinverzahnung im Verband=treppenförmiger Rissverlauf	132
Abb. 5.21	Abriss der Hausecke, die auf Stahlträgern ruht, infolge thermischer Spannungen	132
Abb. 5.22	Schwindrisse im Wärmedämmunterputz	133
Abb. 5.23	Ansbach, St.Gumbertus-Kirche, Westtürme. Die aus der Not geborene dreitürmige Westfassade von Gideon Bacher ist heute ein Wahrzeichen der Stadt	134
Abb. 5.24	Fachwerkhaus mit total zerstörtem Sockel	136
Abb. 5.25	Mit Natursteinen ausgemauertes Gefach	137
Abb. 5.26	Ausspänen der Fugen zwischen dem Mauerwerk und einer Bohlenbalkendecke	137
Abb. 5.27	Kissenförmig vorstehender Gefachputz	138
Abb. 6.1	Ebrach, Gotische Pfarrkirche. Orientierungssystem im Grundriss. Zeichenerklärung: Die äußeren Zahlen sind Jochnummern. <i>Q</i> Querhaus, <i>QS/QM/QN</i> südliches, mittleres, nördliches Querhaus; <i>C</i> Chor, <i>CU</i> Chorumgang, <i>L</i> Langhaus, <i>MK</i> Michaelskapelle, <i>S</i> Sakristei. Die den Chor umfassenden Kapellen sind nur mit einfachen Nummer gekennzeichnet	141

Abb. 6.2	Ronneburg, Kapellenerker. Das nicht mehr standsichere Gewölbe des Erkers musste mit Balken abgestützt und damit gesichert werden.	142
Abb. 6.3	Ein nur ungenügend gesichertes Haus in Erfurt im Jahr 1990	142
Abb. 6.4	Erlangen, Orangerie, Das Traufgesims wurde durch den Deckenschub abgerissen.	143
Abb. 6.5	Würzburg, Bischöfliches Archiv. In modernen Magazinen bewahren Archive wichtige Quellen zu Bau und Umbau von Gebäuden auf.	146
Abb. 6.6	Evangelisches Pfarrarchiv Weisendorf/Mfr., Turmknopfkunde 1756. Stark beschädigte Urkunde, die über die Reparatur des Kirchturms genaue Auskunft gibt.	146
Abb. 6.7	Vermulmter Eckständer zusammen mit einem Zollstock fotografiert	147
Abb. 6.8	Aufmaßskizze: Stufen vom Wohnzimmer zum Wintergarten	148
Abb. 6.9	System RWTH Aachen: Erfassung der Natursteine am Westturm von St. Quirin in Neuss.	149
Abb. 6.10	Schadensfall nach MDDS: Abblättern salzgeschädigter Backsteinoberflächen	149
Abb. 6.11	Überprüfung des Schmutzwasserkanals mit Hilfe einer kleinen Videokamera	153
Abb. 6.12	Mit einem Setzdehnungsmesser lassen sich die Bewegungen der Rissflanken genau messen	154
Abb. 6.13	Büsche wachsen auf der Stützmauer	154
Abb. 6.14	Links Nachträgliche Um- und Einbauten z. B. Verstärkungen, Reparaturen. <i>Mitte</i> Stellenweise innere Verwitterung von Steinen und Mörtel. <i>Rechts</i> Eiserne Anker, Nadeln, Spannglieder	155
Abb. 6.15	Thermographie. Die untere, dunkle, kältere Zone der Außenwand zeigt die aufsteigende Feuchte an	155
Abb. 6.16	Streiflicht macht Putzschäden sichtbar.	156
Abb. 6.17	Schottersmühle/Ofr., Erdgeschoss. Handaufmaß des Verfassers (verkleinert). Genauigkeitsstufe I	159
Abb. 6.18	Bamberg, Kutschenremise. Verformungsgtreuer Querschnitt durch das Gebäude. Mit verschiedenen Farben sind die Baualtersstufen verschiedener Bauteile eingetragen. Genauigkeitsstufe II.	160
Abb. 6.19	Bamberg, Kutschenremise. Verformungsgtreues Aufmaß, Längsschnitt (verkleinert). Deutlich ist die Schiefstellung im Giebelbereich (<i>rechts</i>) erkennbar. Genauigkeitsstufe III ...	161
Abb. 6.20	Ebrach, Pfarrkirche, südliches Langhaus (LS). Steingenaues Aufmaß des Mauerwerks über dem Gewölbe ...	162

Abb. 6.21	Bamberg, Dominikanerkirche, steingenaues verformungsgetreues Aufmaß. Hier werden elektronische Geräte wie Lasertheodolit und Computer mit entsprechender Software eingesetzt	163
Abb. 6.22	Mehrere Freilegungsschnitte an einer historischen Zimmerwand	165
Abb. 6.23	Öffnung des Fußbodens zur Feststellung der Tragfähigkeit der Wand.	165
Abb. 6.24	Altmorschen, Kloster Heydau. Archäologische Grabung zur Freilegung einer historischen Wasserleitung aus Bleirohren	166
Abb. 6.25	Kernbohrung in Sandstein	167
Abb. 6.26	Bohrkern luftdicht verpackt	168
Abb. 6.27	Höhenprofil einer Kernbohrung am Beprobungspunkt 1 (BPS 1)	170
Abb. 6.28	Zahnarztpraxis in Schkeuditz vor der Sanierung	171
Abb. 6.29	Die Löcher in dieser Sandsteinwand im Schlossbergmuseum in Chemnitz wurden teilweise mit PU-Schaum geschlossen.	172
Abb. 6.30	Innerer Aufbau von zweischaligem Mauerwerk: <i>links</i> sehr klüftige oder auch abgesackte Innenfüllung von mehrschaligem Mauerwerk; <i>rechts</i> Flächige Ablösung äußerer Schichten oder Schalen	173
Abb. 6.31	Insbesondere beim Verlegen von Wasser- und Abwasserrohren im Altbau muss sorgfältig auf den Schallschutz geachtet werden.	175
Abb. 7.1	Die Mauerlunge findet man jetzt nur noch selten in Altbauwänden. Einst wurde sie aber flächendeckend in den Altbauarealen eingesetzt, bis man ihre Nutzlosigkeit, ja sogar ihre Schädlichkeit erkannte.	184
Abb. 7.2	Das Verfliesen der Haussockel führt zu Schäden oberhalb des Sockels	184
Abb. 7.3	Auswertung der Beprobungsstelle BPS1, entsprechend dem Höhenprofil Abb. 6.27	186
Abb. 7.4	Mauersägeschnitt mit Einbau einer bituminisierten Folie	188
Abb. 7.5	Aus dem mehrschaligen Mauerwerk der Schottersmühle fällt die lose Innenfüllung heraus	189
Abb. 7.6	Abschnittsweiser Mauerwerksaustausch, Unterfangung mit Mauerwerk aus Kalksandsteinen	190
Abb. 7.7	St. Gumbertuskirche, Ansbach. Vor das Backsteinmauerwerk des Sockels wurden starke Granitplatten gesetzt.	191
Abb. 7.8	Oberdachstetten, Pfarrkirche. Der vor die Sockelmauer geblendet Sandstein hat die Salzlast auf Dauer nicht verstecken können	191

Abb. 7.9	Iphofen/Ufr., Pfarrkirche. Die versalzene alte Sandsteinplatten wurde abgestemmt und an ihre Stelle neue Sansteinplatten versetzt	192
Abb. 7.10	In die aufgeschnittene Mauerfuge wurde eine Dichtungsbahn eingelegt	193
Abb. 7.11	V-Schnitt-Verfahren. a der 1.Schnitt wird schräg gesetzt. b er wird anschließend mit vergütetem Mörtel verfüllt. c der 2.Schnitt erfolgt von der gegenüberliegenden Mauerseite. d er wird ebenfalls sorgfältig verfüllt	195
Abb. 7.12	Bohrlochsperrre. Die Löcher wurden in zwei Reihen übereinander versetzt gebohrt	198
Abb. 7.13	Injizierung von zweischaligem Mauerwerk	201
Abb. 7.14	Bohrlochabstände nach (Nadoushani 1992)	202
Abb. 7.15	Keller in unsaniertem Zustand	207
Abb. 7.16	Auf verschweißten Bitumenbahnen wurde die Bewehrung für einen Betonfußboden ausgelegt. Die Wände wurden mit einer dichten Betonvorsatzschale ausgestattet	207
Abb. 7.17	Der Keller nach der Instandsetzung	208
Abb. 7.18	Die Fugen des Sockelmauerwerks wurden mindestens 5 cm tief ausgeräumt	209
Abb. 7.19	Die fertig mit einer Bitumen-Dickbeschichtung vertikal abgedichtete Kellerwand wurde anschließend mit einem Schutzvlies gegen Beschädigung gesichert	210
Abb. 7.20	Alle Öffnungen im Mauerwerk müssen sorgfältig verschlossen werden	211
Abb. 7.21	Nachträgliche Abdichtung durch Flächeninjektion nach (Kabrede 1998)	212
Abb. 7.22	Normgerechte Verlegung eines Dränagerohres ist am Altbau oft ungeeignet, weil sich unter der Dränage Wasser sammelt, das in das alte Fundament eindringt und es durchfeuchtet	213
Abb. 7.23	Aneinander angeschlossene Dränageschächte ermöglichen ein rückstausicheres Abführen des Dränagewassers	214
Abb. 7.24	Das Salz dringt bereits aus den Fliesenfugen. Es kann abgebürstet werden	216
Abb. 7.25	Bauschädliche Salze zerstören die Wandoberfläche. Hier kann Salzumwandlung die Lösung des Problems sein	217
Abb. 7.26	Eine unfachmännisch angebrachte Folienrinne ist unbrauchbar und wird ablaufendes, salziges Wasser nicht auffangen können	220
Abb. 7.27	Altmorschen, Kloster Heydau. Infolge Absenkung abgerissener Stützpfeiler der gotischen Kirche	222
Abb. 7.28	Ansbach, Altstadt um 1720. (Rekonstruktionszeichnung) Durch den Einbau einer Kanalisation wurde das Grundwasser abgesenkt	223

Abb. 7.29	Ansbach, Residenzschloss. Die verfaulten Köpfe der Fundamentpfähle mussten mannshoch abgeschnitten werden	225
Abb. 7.30	Ansbach, Residenzschloss. Ansicht der 1925–1930 unterfangenen Südostfassade heute	226
Abb. 7.31	Landshut, Stadtkirche St. Martin. Höchster gotischer Backsteinkirchturm der Welt	226
Abb. 7.32	Landshut, Stadtkirche St. Martin. Grundriss mit Eintrag der Turmunterfangungen	227
Abb. 7.33	Abschnittsweise Mauerwerksunterfangung mit Beton.	227
Abb. 7.34	Villa in Glauchau in unsaniertem Zustand. Neben dem Treppenhaus befindet sich ein ebenfalls später angebauter Außenkamin	228
Abb. 7.35	Villa in Glauchau. Völlig unbrauchbare und gefährlich schwache Abstützung für die Unterfangung des Treppenhauses	229
Abb. 7.36	Villa in Glauchau. Die fertige Unterfangung des Treppenhauses	230
Abb. 7.37	Gewi-Endverankerung gekonert. Abstandshalter im Bohrloch sichern die allseitige satte Umhüllung des Gewindestahls. (Nach Wenzel 2000)	230
Abb. 7.38	Der vom Gebäude abgerissene Pfeiler wurde mit Gewindestählen (Gewi-Stähle) wieder standsicher vernadelt	234
Abb. 7.39	Die Risse zwischen Pfeiler und Gebäudewand sowie die Löcher im Pfeiler selbst wurden mit Zementsuspension injiziert	235
Abb. 7.40	Damit die auf die Gewi-Stäbe wirkenden Kräfte nicht zu Abspiegelungen des Putzes führen, wurden sie mit einem Edelstahlband als Endverankerung untereinander gesichert	236
Abb. 7.41	Der Riss zwischen Pfeiler und Gebäude wurde mit einer Zementsuspension verpresst	237
Abb. 7.42	Der Riss in der Treppenwand wurde vernadelt. Die Nadeln wurden freilich sehr kurz gewählt, aber an ihren Enden umgebogen. Der Riss ist bis heute nicht mehr aufgetreten	238
Abb. 7.43	Die Fugen des Sandsteinmauerwerks wurden mit Trassmörtel ausgefügt	244
Abb. 7.44	Melsungen, Bartenwetzerbrücke. Die Fugen im Mauerwerk wurden sauber ausgekratzt	245
Abb. 7.45	Melsungen, Bartenwetzerbrücke. Ansicht des fertig verfügten Brückenmauerwerks	245
Abb. 8.1	Reinigungspasten werden bei festhaftendem Altanstrich häufig eingesetzt. (Blau eingefärbte Wandfläche)	248
Abb. 8.2	München, Königsplatz. Um die Schadensbilder am Giebeldreieck der Propyläen genau feststellen zu können, wurde ein Hubwagen eingesetzt	249
Abb. 8.3	Altanstriche haben sich in geschützten Bereichen, z. B. über der Haustür, erhalten	250

Abb. 8.4	Graffiti auf einer Hauswand sind oft hässliche Verunstaltungen	251
Abb. 8.5	Melsungen, Bartenwetzerbrücke. Gereingtes und neu verfügtes Brückengewölbe	252
Abb. 8.6	Mit Hilfe einer Staubkabine kann der die Fassade reinigende Handwerker sich selbst vor anfallendem Staub schützen	254
Abb. 8.7	Sorgfältig mit Folien verschlossene Fenster verhindern das Eindringen von Strahlwasser	255
Abb. 8.8	Stuckdekor wie dieses Engelköpfchen in einer Muschel muss vom Restaurator gereinigt werden	255
Abb. 8.9	Unzureichende Folienrinne, die sofort nach den Abfallrichtlinien geändert werden muss.	259
Abb. 8.10	Undichte Planen halten das Wasser des Strahlgerätes nicht zurück	260
Abb. 9.1	Durch Volltränkung der Statue auf der Attika der SO-Fassade des. Residenzschlosses in Ansbach weist im Gegensatz zur Attika selbst keinerlei Bewuchs mit Moosen oder Algen auf. Sie ist gleichsam steril	265
Abb. 10.1	Fulda, Stadtkirche. Die mittlere Sandstein-Travée wurde rot gefasst	272
Abb. 10.2	Mauerkrone. Grasbewuchs: gute Dauerhaftigkeit; waagerechter Abschluss: ungeeignet; Bischofsmütze aus Werkstein: guter Schutz gegen eindringendes Wasser; Bischofsmütze gemauert: keine dauerhafte Lösung; geneigter Abschluss: keine dauerhafte Lösung; dachförmiger Abschluss: mittelmäßige Dauerhaftigkeit. Die nachhaltigste Lösung wäre eine überkragende oberste Platte mit einer ausreichenden seitlich Tropfnase	273
Abb. 10.3	Melsungen, Bartenwetzerbrücke. Die obersten maroden Geländersteine wurden durch Reprofilierungsmörtel im Abgussverfahren ersetzt	273
Abb. 10.4	Schadhafte Fensterverdachung aus Sandstein. Der geschädigte Bereich wurde ausgestemmt und mit Reprofilierungsmörtel repariert	274
Abb. 10.5	Schadhafte Fensterverdachung aus Sandstein. Die geringfügige Bestoßung der Kanten muss nicht unbedingt repariert werden	275
Abb. 10.6	Total versalzene Kellerwände	277
Abb. 10.7	Der versalzene Putz wurde abgeschlagen, die Wände gesäubert und die Fugen ausgekratzt	278
Abb. 10.8	Spritzwurf auf sehr weichem Backsteinmauerwerk	279
Abb. 10.9	Auftragen von Sanierputz auf die vorbereitete Wand	280

Abb. 10.10	Der mit Sanierputz versehene Keller ist jetzt als Büraum nutzbar.	281
Abb. 10.11	Oberhalb der Sockelleiste hat Tauwasser Farbe und Putz geschädigt.	282
Abb. 10.12	Diffusionsdiagramm nach „Glaser“	284
Abb. 10.13	Mit einem WDVS aus Styropor versehene Schulhausfront	285
Abb. 10.14	Die Obergeschosse des Mehrfamilienhauses vor der Instandsetzung	286
Abb. 10.15	Hoffassade nach Aufbringen einer WDVS.	287
Abb. 10.16	Erlangen, Geudersches Schloßchen. Ansicht von Süden vor der Sanierung.	288
Abb. 10.17	Erlangen, Geudersches Schloßchen. Ansicht von Osten. Vor dem Fachwerkgiebel befinden sich Garagen.	289
Abb. 10.18	Erlangen, Geudersches Schloßchen. Der Fachwerk-Ostgiebel wurde auch zur Überbrückung der Fugen und Spalten mit einer WDVS aus Mineralwolle versehen	291
Abb. 10.19	Erlangen, Geudersches Schloßchen. Auf einen eigens ausgebildeten Sockel wurde verzichtet. Er wurde nur farbig abgesetzt.	292
Abb. 10.20	Erlangen, Geudersches Schloßchen. Die neuen Fensterbänke des Ostgiebels wurden an das WDVS angepasst	293
Abb. 10.21	Erlangen, Geudersches Schloßchen. Anschluss der Sandsteinfassade an die Wärmedämmung der Südseite.	293
Abb. 10.22	Auf dem Markt sind bereits verschiedene VIP – Elemente. Hier wird die VIP/Qasa Elementfamilie der Fa. Variotec gezeigt	294
Abb. 10.23	Eine mit Mineralwolle innen gedämmte Außenwand	296
Abb. 10.24	Innen mit Klimaplatten gedämmter Erker	297
Abb. 10.25	Der Westgiebel, aus Sandsteinquadern gemauert.	297
Abb. 10.26	Der enge Erker im Westgiebel wurde mit einer Innendämmung aus 60 mm starken Kalcium-Silikat-Platten versehen	298
Abb. 10.27	Vorbereitung des Putzgrundes für den Auftrag von Wärmedämmputz im Fensterbankbereich	300
Abb. 10.28	Sackrisse (<i>links</i>), Schrumpfrisse (<i>rechts</i>).	302
Abb. 10.29	Schwindrisse, sog. Y-Risse.	303
Abb. 10.30	Fugenrisse an der Wand der Kalvarienberg-Kapelle in Schnaittach/Mfr	304
Abb. 10.31	In das Mauerwerk der Treppenhauswand wurde ein Betonringanker eingesetzt. Die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit hat zu diesem Wärmebrückenriss geführt	305
Abb. 10.32	Bamberg, Dominikanerkloster. Vorläufig gesicherter Setzungsriß in der Wand	305

Abb. 10.33	Detail einer Überbrückung eines Holzbalkens im Mauerwerk: Deutlich sieht man, dass das Streckmetall auf dem Balken angenagelt wurde, also auf dem Teil, der sich stets bewegt. Der Putzschaden ist nicht zu vermeiden!	306
Abb. 10.34	Fulda, Altes Rathaus. Der Sandstein wurde mit Silicatfarben gefasst	309
Abb. 10.35	Fassade eines Wohn- und Geschäftshauses mit Silikonharzfarbe beschichtet	310
Abb. 10.36	Algen auf der Fassade einer Gebäudeaußenwand	311
Abb. 10.37	Mauerwerk und Pfeiler mit starkem Bewuchs	312
Abb. 10.38	Algenbefall über gekippten Fenstern	313
Abb. 10.39	Schimmelbefall in der Raumecke.	316
Abb. 10.40	Schimmelbefall unter dem Herd.	317
Abb. 10.41	Wärmedämmputz im Bereich des Haussockel und rings um das Kellerfenster herum	318
Abb. 10.42	Schimmel auf dem offen liegenden Wasserrohr.	319
Abb. 10.43	Sockelleistenheizung im ausgebauten Dachgeschoss	320

Sachregister

A

- Abbeizen, 250, 259
- Abbeizmittel, 256
 - aggressives, 256
 - CKW-haltiges, 259
 - CKW-freies, 256
 - wässriges/nichtwässriges, 255
- Abdichtung
 - bei drückendem Wasser, 206
 - bei nichtdrückendem Wasser, 210
 - elektrophysikalische Verfahren, 204
 - flexible Dichtungsbahnen, 187
 - horizontale, 208
 - nachträgliche, 209, 212
 - starre Platten, 187
- Vergussmasse, 187
- vertikale, 105, 185, 205
- Abdichtungsmaßnahme, 208
- Abdichtungssystem, zementgebundenes, 208
- Abflussrinne, 103, 260
- Ablaugen, 248
- Abpresszeit, 235
- Abstandshalter, 233, 279
- Abstrahlen, 250
- Abstützung, 141, 187, 237
- Acrylfarbe, 308
- Acrylatlasur, 308
- Acrylharz, Tränkung von Natursteinen, 265
- AET-Verfahren, 204, 221
- Algen, 124, 152, 244, 312, 313
- Alkalimethylsiliconat, 199
- Alkalisilikat, 199
- Altern, 5
- Alterungsprozess, 5
- Anamnese, 3, 145, 263
 - Kosten, 145
- Ankerkörper, 239
 - aus Stahlbeton, 239
- Ankernadel, 236
- Ankerplatten aus Stahl, 239
- Ankerstab, 230
- Ansbacher Schloss, 37, 223

Anstrich, 4

- Aufmaß,
 - annähernd wirklichkeitstreues, 158
 - exaktes und verformungstreues, 160
 - verformungstreues, 142, 152
- Ausbauchung, 3, 152
- Ausblühung, 125, 127, 222, 250, 283
 - weiße, 108, 150
- Ausgleichsfeuchte, 112, 129
- Außenabdichtung, vertikale, 228
- Außenputz, 278, 306
- Außenschale, 19, 26, 238, 243
 - Füllung, 21

B

- Backstein, 28, 29
 - Gewölbe, 38
 - schlechter, 123
- Backstein, 37, 40
- Backsteinaußenwände, 282
- Backsteinaußenwände, 33
- Backsteinformat, 46
 - Dünnformat, 53
 - Großformat, 53
 - Klosterformat, 44
 - mittelalterliches, 44
 - neuzeitliches, 44
 - Normalformat, 53
 - Reichsformat, 51
- Backsteinformat, 44, 45
- Backsteinmaß, 46
- Backsteinmauerwerk, 30, 37, 58, 59, 120, 191, 196, 199
 - Lagerfuge, 237
 - mittelalterliches, 43
- Backsteinverband
 - Amerikanischer Verband, 44
 - Binder, 44
 - Binderverband, 42
 - Blockverband, 44
 - Flämischer Verband, 44
 - gotischer, 43

- Holländischer Verband, 44
 Klosterverband, 42
 Kreuzverband, 44
 Läuferverband, 42
 märkischer, 43
 märkischer Verband, 42
 polnischer, 43
 Reichsformat, 43
 Stoßfuge, 43
 Wechselverband, 43
 Wilder Verband, 44
 Bariumsulfat, 217
 Barock, 29, 44, 46
 Basalt, 9, 55
 Bauaufnahme, 158, 163
 verformungsgetreue, 4
 Baubeschreibung, Systematik der, 140, 143
 Baugrund, 2, 54, 104, 131, 205
 labiler, 134
 Benetzungswinkel, 108, 266, 269
 Beschichtung, 249
 Entfernen, 247
 hydrophobe, 266
 mit Bitumen, 209, 250
 mit Chlorkautschuk, 250
 mit Epoxidharzen, 250
 mit Gummierungen, 250
 mit Latex, 250
 organische, rissüberbrückende, 306
 rissverfüllende, 307
 Beschichtungssystem, 306
 Beton, 187, 221, 227
 B 25, 207
 römischer, 18
 Betonfundament, 229
 Betonit, 211
 Betonrippenstahl, 230, 231
 Betonstahl, 231, 232, 238
 Betonwerkstein, 31
 Bims, 241
 Bindemittel, 3
 Bindemittelauswaschung, 172
 Bindemittelumlagerung, 121
 Bitumen, 54, 58, 187
 Bitumendickbeschichtung
 kunststoffmodifizierte, 209
 Bitumenemulsion, 200
 Bitumenfolie, 192
 Bitumenpappe, 54, 135, 207
 Bitumenschweißbahn, 209
 Bleidübel, 14
 Bleihexafluorosilicat-Lösung, 217
 Bogensteine, 38
 Bohrloch, 197, 201, 202, 230, 233
 Kontrolle mit Endoskop, 234
 Bohrlochabstand, 202
 Bohrlochentlüftung, 235
 Bohrlochwand, 233, 235
 Bohrwasser, 233
 Bohrwiderstandsmessgerät, 164
 Bohrwinkel, 202
 Brauchwassersystem, 214
 Bruchmechanismus, 172
 Bruchstein, 13, 20, 24, 26, 40
 Bruchsteinmauerwerk, 16, 172
 einschaliges, 241
 Buckelquader, 23
- C**
 Chrom-Nickel-Molybdänstahl, 187
 Chromstahl, ferritischer, 187, 196
- D**
 Dampfsperre, 295
 Deckenschubriss, 305
 Dehnungsfuge, 306
 Denkmalpflege, 5, 7, 218
 Denkmalpflege, 33, 204, 239
 Denkmalschutz, 5
 Denkmalschutz, 175
 Diabas, 55
 Dichtungsbahn, 193, 208
 bituminöse, 187
 flexible, 187, 189
 Dichtungsschlämme,
 flexible, 206, 208, 209
 Diffusion, 111, 113, 115
 Diffusionsgefälle, 115
 Diffusionswiderstand, 115, 300, 307
 Diffusionswiderstandszahl, 115
 DIN 1045, 187
 DIN 105, 45, 52
 DIN 1053, 205
 DIN 1164, 232
 DIN 16945, 273
 DIN 17007, 187
 DIN 18190, 187
 DIN 18195, 54, 104, 187, 205, 213, 277
 DIN 18550, 275, 291
 DIN 18550-3, 299
 DIN 18557, 273, 299
 DIN 4095, 205, 213
 DIN 4102, 175
 DIN 4102-1, 299
 DIN 4102-7, 176
 DIN 4108, 283

- DIN 4108 – 3, 111
DIN 4108–3, 295
DIN 4109, 174
DIN 4123, 187
DIN 488-1, 231
DIN 488-2, 231
DIN 52103, 56
DIN 52617, 115
DIN EN 10080, 231
DIN EN 10088, 231
DIN EN 13829, 295
DIN EN 15026, 290
DIN EN 998-1, 291
DIN EN ISO 10 211, 295
DIN EN ISO 13788, 295
Diorit, 9
Dispersionsfarbe, 308, 317
Dispersionssilikat-Füllfarben
 wasserabweisende, siliconharzvergütete, 307
Dokumentationsformen, 140, 142
Dränage, 105, 130, 183, 185, 210, 213, 214, 223
 nach DIN 4095, 213
Dränageleitung, 213
Dreieckziegel, 38
Druck
 osmotischer, 113
Druck, hydrostatischer, 105
Druckfestigkeit, 232
Durchfeuchtung, 57, 124, 135, 185, 205, 242
 kapillare, 108, 169
Durchfeuchtungsgrad, 151, 169, 185, 200, 277
 kapillarer, 199, 203
Durchfeuchtungshöhe, 106
Durchschuss, 18, 39
Dydiwag-System, 239
- E**
E DIN EN 13 501–2, 176
Edelstahlblech, 192
Einschlagen von Spezialblechen, 4
Eisenklammer, 14, 17
Eisenportlandzement, 241
Elektrode, elektrophysikalische, 7
Elektroosmose, 183, 203
Endoskop, 154, 172, 188
Endverankerung, 230, 231
Endverankerungsstück, 232
Energieeinsparverordnung, 282, 290
Energiekennzahl, 287
Entlastungsbögen, 10, 33
Entlastungsdreieck, 11
- Entsalzung, 113, 183, 185, 204
 mit Kompressen, 218
Entsalzungsverfahren
 elektrophysikalische, 220
Entsorgung, 260
 fachgerechte, 247
 von Schlämmen und Strahlgut, 258
Epoxidharze
 zur Verfestigung und als
 Verfüllsusension, 265
Erdfeuchte, 59, 105, 206
Erfassung, skizzenhafte, 140, 147
Ergussgestein, 55
Erneuern, 5
Ettringit, 241
- F**
Fabrikantenvilla, 228
Farbschlämme, 247, 258
Fassung, 4, 33
Feinstzement, 241
Feldstein, 13
Fenstergewände, 29, 46
Feuchte, 117
 absolute, 110
 aufsteigende, 4, 54, 58
 hygroskopische, 111, 113
 relative, 110
 Schutz gegen aufsteigende, 56
Feuchte- und Salzschäden, 3
Feuchtebilanz, 151, 185
Feuchtemessgerät, 156
Feuchtemessung, 150
Feuchteprofil, 169, 277
Feuchteschäden, 117
 hausgemachte, anthropogene, 127
Feuchteschutz, 309
 historischer, 54
Feuchteverhalten, hygroskopisches, 157
Feuchtigkeitsgehalt, 103, 108
Filterschicht, 213
Fischgrätmuster, 19
Flächendränage, 206, 207
Flächeninjektion, 211
Folie
 reißfeste, 4
Folienrinne, 195, 220
Folienwanne, 258, 259
Formstein, 38, 49
Formziegel, 38
Fotogrammetrie, 140, 163
Freihandzeichnung, 158
Freilegungsschnitt, 164

Frostschäden, 312

Frost-Tau-Wechsel, 117, 118

Fuge, enge, 27

Fugenausbildung, 172, 245

Fugenmalerei, 22

Fugenmörtel, 123, 165, 198, 215, 245, 272, 278

alter, 243

loser, 251

Verfestigung, 265

zermürbter, 215

zerstörter, 248

Fugenriss, 303, 304

Fugenritzer, 245

Füllmasse, 17, 18

Füllwand, 26, 31

Füllwerk, 26, 27

Fundament, 1, 62, 64, 117, 140, 189

Fundamentholzpfähle, 63, 224

Fundamentverstärkung, 227

G

Gebäudesubstanz

Eingriffe in die, 150

Genaugkeitsstufen, 158

Gewändestein, 33, 34

Gewebestrümpfe, 232

Gewindestange, 230

Gewindestange, 231

Gewölbe, 12, 18, 22, 29, 133

Gewölbe, 134

Gips, 242

Gipsmarke, 152, 277, 302

Gipsmörtel, 25, 193

Gipsstein, 9, 193

Gipstreiben, 199, 241, 304

Glasfasergewebe, 187, 306, 307

Glaswände, diaphane, 26

Gleichgewichtsfeuchte, hygroskopische, 199

Gotik, 24, 36

H

Halbsteinverband, 24, 39

Handaufmaß, 140, 142, 147

Hochlochziegel, 179, 300

Hochofenzement, 236, 241

hochsulfatbeständiger, 224

Höhenprofil, 169

Hohlräume im Mauerwerk, 4, 56

Holzpfahlgründung, 222

Horizontalabdichtung, nachträgliche, 185

Hydratation, 232

hydraulische Bindemittel, 241

Hydraulik, 225

Hydrophobie, innere, 310

Hydrophobieren, 4, 191, 218, 268, 278

Hydrophobierungsmittel

Acrylharze, 268

Anwendung, 268

Kieselsäureester, 268

Kriterien, 269

Saugfähigkeit, 266

Silane, 268

Siliconharze, 268

Siloxane, 268

Hygroskopizität, 104, 111, 112

I

Impuls-Sprühverfahren, 201

Impulsverfahren, 203

Inaugenscheinnahme, persönliche, 1

Injektion, 185, 197

Kalksandstein, 199

Porenbeton, 199

von Kunsthären, 242

von Zementmörtel, 188

Injektionsbohrung, 198

Injektionsgut, 198

Acrylharzgel, 211

Betonit, 211

feuchteverträgliche EP-Harze, 211

PUR-Harz, 211

Silikat, 211

Zement, 211

Injektionsmittel, 185

Lagerfuge, 199

Injektionsschleier, 212

Injektionsstoff, 197

Injektionsverfahren, 197, 199

Injizieren, 221, 222, 240

Instandsetzung, 1

Instandsetzungsbeton, 187

Instandsetzungsmaßnahme, 4, 174, 183

Instandsetzungsplanung, 140, 174

J

JOS\Verfahren, 244

JOS-Verfahren, 253

K

Kaliumsilicat, 217

Kaliumsilikat, 309

Kaliwasserglas, 309

Kalk

hydraulischer, 211, 243

Kalkausblühung, 121

Kalkauswaschung, 121

Kalkfarben, 59, 308

- Kalkkaseinfarbe, 308
Kalklehmputz, 59
Kalkleim, 240
Kalkmörtel, 13, 14, 18, 33
 fetter, 22, 60
 gipshaltiger, 241
Kalkmörtelkompresse, 219
Kalkmörtelschicht, 21
Kalkplatte, 19
 schiefrige, 23
Kalkputz, 20, 33, 289
 hydraulischer, 238
Kalkstein, 9, 18, 22
Kalksteinquader, 10
Kalktuff, 10, 14
Kalktuffquader, 10
Kalkwandputz, 238
Kalkzementmörtel, 211
Kalzium-Silikat-Platten, 296, 298, 321
Kapillardepression, 108, 266
Kapillarität, 219
 Steigerung, 241
Kapillarkondensation, 111
Kapillarporosität, 235
Kapillarradius, 106
Kapillarraum, 199
Kapillartransport, 198
Keilstein, 38, 40
Kenndatenprofil, 249
Kerbriss, 303
Kernbohrverfahren, 194, 197, 234
Kieselsäureester, 264, 265, 268
Kieselsäureethylester, 265
 Anwendung, 267
Kieselsäureethylesterpräparat, 267
Kieselsäureethylesterverfahren, 266
 mit Hydrophobierungsmitteln, 266
Klima, materialinternes, 111
Klinker, 31, 51
Klosterformat, 44
Kompressen, 218
 Flächen zur Bemusterung, 219
Kompressenputz, 218
Kondensat, 124
 Schäden durch, 282
Kondensatausfall, 289
Kondensation, 103, 108, 109, 127, 300
 innere, 109
 kapillare, 111, 129
Kondenswasserbildung, 183, 274, 282
Konservieren, 5, 263
Konservierungsmaßnahme, 263, 264
 Durchführung, 266
Konservierungsmittel, 264
Barythhydrat, 263
Barytwasser, 264
Epoxid- und Acrylharze, 264
Fluate, 264
Flusssäure, 264
Gelatine, 264
Hydrophobierungsmittel, 264
Kieselsäureester, 264
Leim, 264
Leinöl, 264
Metallsalze (MOS-Verfahren), 264
Mohnöl, 264
Paraffin, 264
Wachs, 264
Wasserglas, 264
Korkplatte, 291
Korrosionsschutz, 230, 233
 der Nadelstähle, 236
Korrosionsschutzmaßnahme, 240
Kraggewölbe, 11
Kristallbildung, 118
Kristallisierungsdruck, 125, 129, 218
Kristallisierungsvorgang, 251
Kunststoffankerstab
 glasfaserverstärkter, 231
Kunststoffdispersion, 309
Kunststofffolie, 187, 189, 209
Kunststoffplatte, 187
Kunstwerkstein, 31
- L**
Laborergebnis, 169
Laboruntersuchung, 168
Lackschlämme, 258
Lagerfuge, 10, 39, 54, 189, 196, 237, 243
Längenänderung, temperaturbedingte, 132
Lanzenverfahren, 244
Lärmschutz, 196, 257
lateres coctiles, 38
Lehm, 46, 58
Lehmformling, 60
Lehmmauerwerk, 58
Lehmmörtel, 54
Lehmmörtelfuge, 54
Lehmpisémauerwerk, 58
Lehmverputz, 59
Lehmwände, 59
Leistungsfähigkeit, kapillare, 106
Lotoseffekt, 269
Luftfeuchtigkeit, relative, 109, 267
Luftporenraum, 199
Luftschicht, äquivalente, 115
Luftziegel, 38
Lunker, 232

M

- Marmor, 22
 Marmorblöcke, 14
 materia caementis, 18
 Maueranker, 47
 Mauerfeuchtigkeit, aufsteigende, 169
 Mauerkrone, 273
 Mauermörtel, 3
 Mauersäge, 194
 Mauersäge, 195
 Mauersägeverfahren, 192
 Mauersägeverfahren, 196
 Mauerschale, 17
 Mauersperrpappe, 54
 Mauertrennverfahren, 185
 Mauerverband, 10
 Mauerwerk aus Natursteinen, 9
 Außenschale, 18, 33
 baukonstruktiver Schutz, 4
 Bekrönung, 163
 Bewuchs, 141
 doppelschaliges, 51
 erdberührtes, 104
 Risse, 3
 Schieffstellung, 3
 Verformung, 131
 Zerklüftung und Hohlräume, 154
 zweischaliges, 1, 10, 121, 190, 197
 Mauerwerksaustausch, 7, 184, 187, 188, 223
 abschnittsweiser, 190
 Fundament, 186
 Standssicherheit, 190
 Mauerwerksdiagnostik, 3, 139
 Mauerwerksentsalzung, 113, 221
 Mauerwerksoberfläche, Reinigung, 247
 Mauerziegel, 3, 31, 38
 industriell gefertigter, 51
 porosierter, 52
 MDDDS (Masonry Damage Diagnostic System), 149
 Mehrstufeninjektion, 201
 Membran, semipermeable, 113
 Messachse, 169
 Messblattskizze, 158
 Messgerät, elektronisches, 225
 Messlupe, 156
 Messung, raumklimatische, 156
 Messverfahren
 analytisches, 147
 stereometrisches, 163
 Metallfolie, 192
 Metallsuchgerät, 156
 Methode, abrasive, 278
 Mikroorganismus, 121, 269
 Mikrozement, 201

Mikrozementsuspension, 201

- Mindestabpresszeit, 234
 Mineralfaserplatte, 291
 Mischmauerwerk, 27, 196
 Molybdänstahlblech, 196
 Moos, 152, 248
 Mörtel
 kunstharzgebundener mineralischer, 199
 kunststoffmodifizierter, 274
 Mörtelfuge, 52, 199
 Salztransport über, 215

N

- Nadel, 230, 231
 Nadelanker, 233
 Naturstein, 3, 9, 114, 272
 eisen- oder manganhaltiger, 309
 Konservierung, 263, 264
 Reinigung, 310
 Natursteinmauerwerk, 21, 26, 120, 172,
 279, 308
 Oberfläche, 271
 Oberflächen, 310
 saugfähiges, 268
 Zerstörung, 215, 249
 zweischaliges, 21, 154, 197
 Natursteinplatte, 31
 Natursteinquader, 16
 Natursteinrestaurierung, 249
 Niederdruckinjektionsverfahren, 212

O

- Oberdachstettener Schilfsandstein, 190
 Oberfläche
 hydrophobe, 109, 266
 Untersuchung vor dem Reinigen, 248
 Oberflächenbewuchs, 124
 Oberflächenerosion, 149
 Oberputz, mineralischer, 306
 Objektbegehung, orientierende, 144
 Ölfarben, 308
 Opferputz, 218, 219
 Opus caementitium, 18, 20
 Opus gallicum, 18
 Opus impletum, 18
 Opus incertum, 16
 Opus isodomum, 17
 Opus pseudoisodomum, 17
 Opus reticulatum, 16, 19
 Opus rusticum, 23
 Opus spicatum, 19, 23
 Orientierungssystem, 119, 140
 verbindliches, 139
 Osmose, 113

P

- P I, 307
P II, 291, 307
Packer, 198, 201, 233
Paraffine, 199, 263
Pflegen, 5
Pisé-Bauweise, 58
Planunterlage, 140
Erstellen von, 158
Plattform aus Stahl, 225
Polygonalmauerwerk, 10
Polymer-cement-concret(PCC), 187
Polymerisatharzfarbe, 308
Polystyrolhartschaumplatte, 285, 291
Polyurethan, 200
Porenbetonstein, 295
Porengefüge, 113, 185, 244
Porenradius, 101
Porenraum, 276
Porenvolumen, 101, 103, 219, 276
Porosität, 56, 101
hohe, 275, 276
Porphy, 9
Portlandölschieferzement, 241
Portlandzement, 31, 58, 241
prEN 14600, 176
Pressfuge, 27
Probeentnahme, 166, 168
Prüfröhrchen nach Karsten, 165
Pumpe, hydraulische, 225
Pumpensystem, 224
Putzausblühung, 276
Putze, 219, 275, 276, 299, 301
Putzmörtel, 306
Putzriss, 294, 302, 304
schmaler, 253
Puzzolane, 241
Puzzolanerde, 18

Q

- Quader, 6, 13
behauener, 17
Quaderfugenmalerei, 21
Quadermalerei, 28, 47
Quadermauerwerk, 172
Qualitätskontrolle, 239, 243
Quarzit, 9
Quarzsandstein, 56, 272
Quellen, 61, 130, 301

R

- Radaronde, 156
Ramme, pneumatische, 4
Rammverfahren, 194, 196
Lärmschutz, 196

Reinigung, Testflächen, 252

Reinigungsmittel, 4, 247, 255, 260, 261, 310
CKW-haltige, 259

Reinigungsverfahren

- abrasives, 247
- chemische, 4
- chemisches, 310
- mechanisches, 210
- nasses, 279
- trockenes, 253

Rekonstruktion, 7, 163

Renaissance, 26

Renovierputz, 307

Reparieren, 5

Reprofilierungsmörtel, 273

Restauriermörtel, 271

reaktionsharzgebundener, 273

Riffelblech, 196

Rissarten, 302

Rissbehandlung, 242

Rissbewegung, thermische, 291

Rissbildung aufhalten, 231

Rissbreite, 131, 242, 302, 304

Risse, 3, 132

bedingt beruhigbare, 301

beruhigbare, 301

dynamische, 302

im Mauerwerk, 188, 224

nicht beruhigbare, 302

Ursache, 302

Rissebilder, 143, 156, 301

Risseverlauf

typischer, 303

Risssanierung, 291

Risstiefe, 156

Rissüberbrückung, 305

Rissverlauf

treppenförmiger, 131

Rissverschluss

flexibler, 305

starrer, 305

Rolleimetrik-Verfahren, 163

Rollschicht, 42

Romanzement, 31

Rundziegel, 38

S

Sackrisse, 302, 307

Sägen, 4

Sägeverfahren, 186, 187

Salz, Ausspülen von, 218, 220

Salzanalyse, 157, 191, 217

Salzausblühung, 185, 276

auf Klinkerfassaden, 220

- Salzbekämpfung, 215, 221
 mechanische, 215
 physikalische und elektrophysikalische, 218
 Salzbilanz, 169, 185, 277
 Salzbremse, 217
 Salze
 bauschädliche, 105, 107, 112, 125, 126, 169, 191, 199, 210, 216, 218, 233, 241, 250, 276, 310
 hygroskopische, 242
 Salzentfernung, mechanische, 215
 Salzgehalt, Untersuchungen zum, 171
 Salzkonzentration, 112, 113
 Salzkristall, 112, 125, 149
 Salzkristallisation, 311
 Salzschäden, 3, 125
 Ausbüllung, 125
 Backsteinoberfläche, 125
 Haussockelbereich, 125
 Kristallisationsdruck, 125
 Porenraum, 125
 Salpeter, 125
 Schadensbilder, 125
 Salztransport, 113, 203
 Salzumwandler, 4, 217, 218, 251
 Salzumwandlung, 217
 chemische, 215, 216, 218
 Sandstein, 1, 9, 22, 30, 64, 310
 Bunt-, 22
 dichter, 55
 Quarz-, 190
 Schilf-, 22
 Stuben-, 22
 weicher, 121, 202, 272
 Sandsteinmauerwerk, 115, 169, 231
 Sandsteinplatte, 190
 Sandstrahlen, 278
 Sanierputz, 4, 191, 271, 275, 276, 280
 Sanierputz/WTA, 207, 208, 212, 218, 278
 Eigenschaften, 275, 281
 Sanierputzsystem, 279
 Sanierputzsystems, 321
 Sanierung, 2
 Sanierungsgeschichte, 145
 Sättigungsdampfdruck, 111
 Sättigungsfeuchte, 103, 106
 Sättigungsgrad, 108
 Sättigungsmenge, 109, 110
 Saugfähigkeit, 56, 219, 253, 266
 kapillare, 107, 309
 Sauggeschwindigkeit, 197, 235
 kapillare, 106
 Saugkraft
 kapillare, 107
 Schäden am aufgehenden Mauerwerk
 am Fundament, 119
 am Natursteinmauerwerk, 120
 am Sandstein, 120
 an mehrschaligen Mauerwerken, 120
 Backsteinmauerwerk, 120
 Schadensaufnahme, 157
 Schadensbilder, 117
 Schadensdokumentation, 146
 Schadenskartierung, 179
 Schadensursache
 biogene, 3
 Schalenmauerwerk, 17, 26, 42
 Schalldämmung, 174, 175
 Schallschutz, 174
 Schallschutzwände, 258, 260
 Scheingewölbe, 12
 Schiefer, 61
 Schieflage, 144, 152
 Schieflistung, 3, 61, 134, 152, 161
 Schimmelpilzbefall, 287, 315, 320
 Schimmelpilzbildung, 124, 127, 282, 298
 Schlämme, 248, 279
 Entsorgung, 258
 problematische, 247
 Schlaudern, 1
 Schleierinjektion, 211, 212
 Schrumpfen, 38
 Schrumpfriss, 302
 Schubriss, horizontaler, 306
 Schwinden, 1, 38, 130, 300, 301
 Schwinderscheinung, 3
 Schwindriss, 123, 133, 232, 303
 Schwindverhalten, 133
 Gewölbe, 133
 Schwitzwasser, 109, 244
 Sedimentgestein, 22
 Seilsäge-Trennverfahren, 195
 Setzdehnungsmesser, 152, 172, 277, 302
 Setzung, 3, 130, 302
 ungleichmäßige, 134
 Setzungsriß, 131, 228, 238, 304
 Setzungsschäden, 129, 197
 Baugrund, 130
 Fundament, 129
 Kalkmörtel, 129
 Lehm, 129
 Sgraffito-Putz, 27
 Sicherheitsmaßnahme, 1
 Sicherung einsturzgefährdeter Bauteile, 152
 Sicherungsmaßnahme, 141, 158
 Sichtmauerwerk, 244

- Sickerpackung, 213, 214
Sickerschacht, 214
Sickerschicht, 214
Silane, 266, 268
Siliconharz, 266, 268
Siliconharzemulsion, 269
Siliconharzfarben, 308, 309
Siliconmikroemulsion, 201, 203
Silikatfarbe, 309
 einkomponentige, 308
 zweikomponentige, 308
Siloxane, 266, 268
Skizze, 1
Sockel, 27, 36, 104
Sondage, 62, 127, 156, 206
Sorption, 112
Spachtelung, mineralische, gewebearmierte, 306
Spannanker, 239, 240
Spannankerkörper, 243
Spannglieder, 239
Spannstäbe, 230, 239
Spannstahl, 239
Spannung, thermische, 132
Sperrbeton, 210
Sperrputz, 152, 183, 198, 208
Sperrsicht
 fehlende horizontale, 125
 fehlende vertikale, 127
 horizontale, 126
 vertikale, 127
Spolien, 21
Spritzwasserschutz, 104
Spritzwurf, 209, 279, 300
Spülverfahren, 220
Stahlanker, 229
Stahlbetonfundament, 225
Stähle, nichtrostende, 231
Stahlnadel, 222, 230, 233, 234
 Verpressung, 235
Stahlträger, 31, 190
Staifix, 239
Standssicherheit des Mauerwerks, 171
Standssicherheitsnachweis, 174
Steighöhe, 106, 108
Stein, ausgetrockneter, 23
Steinergänzung, 268, 271
Steinergänzungsmörtel, 4, 272
Steinersatzmasse, 192
Steinformat, 14, 23
Steinmetzzeichen, 41
Steinquader, 244
Steinverfestigungsmittel, 4
Stoßfuge, 10, 13, 42, 52
Strahldüse, Führung, 261
Strahlgerät, 209, 215, 244, 261, 278
Strahlgut, 250, 254, 258
Strahlmittel, 244, 253, 257
 Entsorgung, 258
Strahlverfahren, 253, 254, 311
Strahlwasser, 253
Streiflicht, Beleuchten mit, 156
Suspension, 188, 199, 232
 zementhaltige, 230
Suspension, mineralische, 221
Syenit, 9, 55
- T**
- Taupunkt, 109, 282, 291
Tauwasser, 124, 179, 212, 282
Tauwasserausfall, 282
Teerpech bei Lager- oder Stoßfugen, 54
Thaumasit, 241
Thermographie, 154
Tiefenprofil, 169
Tragfähigkeit, 171
Translozierung, 163
Trass, 18, 241, 272
Trasskalk, 211, 241, 243, 245
Trasskalkmörtel, 211
Trassmörtel, 244
Trasszement, 232, 241
Treiberscheinung, 193
Treibmineralien, 242
Trenngerät, 194
Trennverfahren, 194
Trittschallschutz, 174
Trockenbohrverfahren, 233
Trockenlegung
 chemische, 184
 elektrophysikalische, 184, 204
 feuchten Mauerwerks, 183
 mechanische, 184
 versalztes Mauerwerk, 183
Trockenmauerwerk, 10, 12
Trockenspritzverfahren, 243
Tuffstein, 21, 23, 40, 56, 268
Turmfundament, 225
Turmmauerwerk, 225
- U**
- Ultraschallgerät, 155
Undulation, 10
Unterfangung, 141, 187, 189, 222, 223, 225
Unterfangungsabschnitte, 224
Unterfangungsarbeiten, 130, 131, 224
Untersuchung
 restauratorische, 145
 zerstörungsfreie, 164
Untersuchung, raumklimatische, 181

- Untersuchungsergebnis, Bewertung, 179, 181
 Untersuchungskosten, 144, 182
 Untersuchungsmaßnahme, 157
 Kosten, 182
 Untersuchungsmethode
 geoelektrische, 157
 substanzschonende, 157
 Untersuchungsmethoden, 139
- V**
 Verankerung
 Folgeschäden, 234
 Verdunstungszone, 107, 183
 Verfugen, 242
 Verfüllmörtel, 193
 Vergelung, 211
 Vermessung, fotogrammetrische, 142
 Vernadeln, 4, 229, 240
 mehrschaligen Mauerwerks, 238
 mit vorgespannten Stählen, 221, 239
 Verpressdruck, 235
 Verpressen, 221, 230, 239, 240
 feine Risse, 242
 Verpressgut, 187, 222, 231, 240
 Fließfähigkeit, 232
 hydrophobes, 241
 Verpresskörper, 230–233, 237, 244
 Verpresskörperfestigkeit, 232
 Verpresslanze, 187, 242
 Verpressmörtel, 198, 221
 Verpresssuspension, 232
 Verschmutzung
 durch Kalk- oder Salzauswaschung, 123
 durch Schmutzpartikel, 123
 hartnäckige, 253
 Verschmutzungsgrad, 172, 247, 277
 Vertikalabdichtung, nachträgliche, 205
 Vertikalsperre, 127, 276
 Verwitterungerscheinung, 3, 148
 Verwitterungsformen, 148
 Volltränkung, 265
 Vormauerziegel, 51
 frostbeständige, 51
 Vorspannen, 221, 239
 Gefügeschäden, 222
 V-Schnitt-Verfahren, 195
- W**
 Wandputz, 105, 164, 319
 Wanne
 innenliegende, 58
 innere wasserdichte, 206
 Wärmeausdehnungskoeffizient, 132
 Wärmebrücke, 127, 154, 282, 292
- Wärmebrückenriss, 304
 Wärmedämmputz, 282, 283, 299, 300
 Wärmedämmung, 3, 176, 177, 190, 211, 282
 Wärmedämmverbundsystem, 282, 283, 289, 299, 312
 Wärmedurchgangskoeffizient, 61, 177, 178
 Wärmeleitfähigkeit, 101, 179, 300, 305
 Wärmeschutzverordnung, 314
 Wasserabgabe, 168
 Wasseraufnahme, 55, 101, 165, 168
 hygroskopische, 111, 112
 kapillare, 102, 103, 106, 108, 112, 169, 277
 Reduzierung, 269
 Wasseraufnahmekapazität, 55
 Wasseraufnahmekoeffizient, 108
 Wasser-Bindemittel-Wert, 232
 Wasserdampfdiffusion, 56, 111, 250
 Wasserdampfdiffusionsfähigkeit, 249, 251
 Wasserdampfdurchlässigkeit, 113, 275, 276, 308, 309
 Wasserdampfkondensation, 108
 Wassereindringkoeffizient, 108
 Wasserkapazität, 103, 108
 Wasserleitfähigkeit, 219
 Wasserschäden, hygroskopische, 127
 Wassertransport
 kapillarer, 203, 249
 Wechselverband, 43
 Weißzement, 272
 Wellplatte, 187, 196
 Werkstein, 20, 23, 26, 40, 139
 Konservierung, 263
 Werksteinblöcke, 21
 Werksteinmauerwerk, 29, 31
 Werksteinsockel, 54
 Werktrockenmörtel, 276
 mineralischer, 273
- Y**
 Y-Riss, 303
- Z**
 Zement, 175
 mit hohem Sulfatwiderstand, 241
 mit niedrigem Alkali-Anteil, 241
 Zementmörtel, 57, 188
 kunststoffmodifizierter, 187
 MG III, 198, 207, 238
 Zementsuspension, 200, 232, 235
 Zementverfüllmörtel, 193
 Zerfallswirkung, mikrobiologische, 121
 Zerstörung, biologisch bedingte, 149
 Zerstörungsprozess, 143, 149

-
- Ziegel
 - Dreiecks-, 38
 - Form-, 38
 - gebrannte, 3
 - glasierte, 47
 - Hohl-, 38
 - Mauer-, 38
 - Rund-, 38
 - Vollziegel, 38
 - Ziegelformate, 46
 - Ziegelmauerwerk, 149, 314
 - Ziegelmehl, 18, 51
 - Ziegelsplitt, 241
 - Ziegelstein, Schwinden/Schrumpfen, 38
 - Ziegelstempel, 38, 41
 - Zierfuge, 20
 - Zugabe, hydraulische, 19
 - Zuschläge, 3
 - Zuschlagstoffe, 18
 - Zustandskartierung, 148
 - Zwischenverpressung, 233, 234
 - Zyklopenmauerwerk, 10