

*Drucken Sie sich die Welt, wie Sie Ihnen gefällt!*

# 3D-Druck

FÜR

# DUMMIES®

## *Auf einen Blick:*

- Die Typen von 3D-Druckern und ihre Anwendungen kennenlernen
- 3D-Modelle erstellen und drucken
- Neue Geschäftsfelder entdecken
- Einen sich selbst druckenden 3D-Drucker bauen

**Kirk Hausman**





# 3D-Druck für Dummies – Schummelseite

## Auswahl eines RepRap für den 3D-Druck

Wenn Sie einen RepRap-Drucker für die private Nutzung suchen, sollten Sie zunächst Ihre speziellen Anforderungen im Hinblick auf Typ, Größe und andere Qualitäten hin analysieren. Dazu gehört auch die Entscheidung, ob Sie einen fertigen Drucker kaufen oder selbst einen bauen wollen. Auch die Gesamtkosten spielen eine Rolle, ebenso wie die Lizenzierungsform, das heißt, ob Sie sich für eine Open Source- oder eine Closed Source-Technologie entscheiden.

RepRap-Drucker mit kartesischem System:

- ✓ **Mendel, Prusa Mendel, Mendel90, Prusa i3:** Dieser Drucker verwendet das gebräuchlichere kartesische Design. Es gibt ihn in zahlreichen Varianten, beispielsweise den stark verkleinerten **Huxley**.
- ✓ **Wallace und Printrbot:** Häufig verwendete Alternativen für den Schulbereich sowie für Druckerbausätze.
- ✓ **MendelMax:** Eine Ableitung vom Prusa Mendel ebenfalls mit kartesischem System.
- ✓ **Ultimaker:** Ein RepRap mit Kastengehäuse, der für die Bewegung das kartesische System einsetzt.
- ✓ **Tantillus:** Ein Mini-RepRap mit Kastengehäuse, der die meisten 3D-druckbaren Teile aller heute verwendeten RepRap-Varianten aufweist.

Neben dem standardmäßigen kartesischen Format gibt es noch mehrere andere Optionen für RepRap-Drucker, unter anderem:

- ✓ **Rostock, RostockMax:** Ein RepRap-Drucker im Delta-Format, der sehr große Baugrößen unterstützt. Der RostockMax ist ein Bausatz aus per Laser ausgeschnittenen Formteilen, dessen Montage wir in diesem Buch als Beispiel für Delta-RepRaps beschreiben.
- ✓ **3DR:** Ein alternativer RepRap-Drucker im Delta-Stil, entworfen von Richard Horne, der auf dem Rostock-Format basiert und im Hinblick auf die Selbstreplikation vom Tantillus inspiriert wurde.

Weitere Entscheidungen, die Sie treffen müssen:

- ✓ Art des Kunststofffadens
- ✓ Rahmenart
- ✓ Extruder
- ✓ Druckplatte
- ✓ Steuerelektronik
- ✓ Software

## Die Steuerelektronik von RepRap-3D-Druckern

Die verschiedenen Steuerkarten (»Shields«) für 3D-Drucker:

- ✓ **RAMPS:** Das ursprüngliche Arduino-Shield, entworfen für die Bewegung unter Verwendung mehrerer Schrittmotoren sowie für die Verwaltung des Extruders und der Druckplattenheizer.
- ✓ **RAMBo:** Eine modulare All-in-one-Kombination aus Arduino-Karte und RAMPS-Shield.
- ✓ **Sanguinololu:** Eine beliebte All-in-one-Karte für den Eigenbau, die Microcontroller und Schrittmotor-Controller integriert.
- ✓ **Minitronics:** Eine kleinere Variante der Sanguinololu.
- ✓ **RUMBA:** Eine modular integrierte Karte mit Modulen, die die LCD-Anzeigen, externe Speicherkarten und andere Add-on-Funktionen unterstützen.
- ✓ **Elefu-Ra:** Ein integrierter Elektroniksatz für Entwickler, der an ATX-Standardnetzteile für den Computer angeschlossen werden kann.
- ✓ **Megatronics:** Der »große Bruder« der Minitronics-Karte, der die Verwendung von Thermokopplern für höhere Temperaturen anstatt der gebräuchlicheren Thermistorsensoren gestattet.

# 3D-Druck für Dummies – Schummelseite

## Einsatzgebiete für den Extruder

- ✓ **Mit Getriebe:** Einige Extruder verwenden zusätzliche Zahnräder, die den Fortschritt des Fadens innerhalb eines Schritts verlangsamen, um eine höhere Kontrolle zu erhalten und um die Kraft zu erhöhen, mit der der Faden in das Hot-End weitergeschoben werden kann.
- ✓ **Verzahnt:** Glatter Kunststofffaden kann vom Extruder unter Verwendung von ineinandergreifenden Zahnrädern oder einer Filamentschraube (mit um den Schraubenumfang herum gefrästen Zähnen) gegen ein Zwischenrad gedrückt werden, damit der Vorschub und das Zurückziehen sorgfältig kontrolliert werden können.
- ✓ **Bowden:** Dieser Extrudertyp lässt den Faden durch eine Röhre verlaufen, die den Extruder und das Hot-End verbindet, statt den Faden direkt in das Hot-End einzuführen. Damit werden beide voneinander getrennt und das Hot-End kann leichter werden, weil der Extrudermotor für nicht-kartesische Formate nicht mehr direkt daran befestigt ist.
- ✓ **Spritze:** Für Designs wie den Fab@Home-Drucker oder RepRaps mit Universellem Pasten-Extruder kann eine Spritze mit einem straffen Gurt angebracht werden, um inkrementell Paste oder Gels statt des geschmolzenen Kunststoffs zu extrudieren.
- ✓ **Mehrfarbig:** Moderne Extruder verwenden mehrere Getriebe und Motoren, um mehrere Fäden gleichzeitig in das Hot-End einzubringen. Durch die Variation der Farbmenge unter Verwendung einer zusätzlichen Elektronik entsteht ein mehrfarbiger Druck, der im gesamten Objekt variiert.
- ✓ **Dual:** Eine häufige Variante mit relativ begrenzter Farbmischung verwendet einen dualen Extruder, nämlich einfach zwei zusätzliche Extruder nebeneinander. Das ist praktisch für Ausdrücke mit PVA (Polyvinylalkohol) oder andere lösliche Stützmaterialien, die in denselben Ausdruck wie der Faden für das eigentliche Objekt integriert werden.

## Verarbeitung des Objektmodells

Nachdem ein Objektmodell erzeugt wurde, muss es in mehreren Schritten verarbeitet werden, bevor der RepRap-Drucker das massive Modell ausdrucken kann.

- ✓ **Stütze:** Anders als Granulatbindersysteme können Extruder den geschmolzenen Kunststoff nicht einfach in die Luft drucken, wo er dann irgendwie gehalten wird. Für Überhänge und lange Brücken muss dem Design ein Stützmaterial hinzugefügt werden, das nach dem Druck entfernt wird.
- ✓ **Fundament:** Abhängig von dem verwendeten Material und der Druckplatte kann es sinnvoll sein, ein Fundament oder eine flach gedruckte Schicht zu verwenden, die als Basis für Ihr Modell auf der Druckplatte dient. Wie eine Stütze wird auch ein Fundament später vom fertigen Objekt entfernt.
- ✓ **Füllung:** Additive Systeme wie der RepRap können beliebig komplexe Strukturen drucken. Ein Objekt kann mit einer soliden Außenwand angelegt werden. Der Innenraum kann vollständig ausgefüllt werden (100 % Füllung), leer bleiben (0 % Füllung) oder irgendetwas dazwischen, wobei ein regelmäßiges Muster aus dünnen Wänden und Zwischenräumen für die Stärke des Objekts sorgen. Die Volumenmenge, die Kunststoff enthält, ist als »Füllung« definiert und gestattet Ihnen, ein 3D-Modell mit sehr viel weniger Kunststoff als massive Äquivalente zu drucken.
- ✓ **Slicing:** Das virtuelle Modell wird als Folge von Schichten berechnet, wobei jede dieser »Scheiben« (Slices) dann in Codes übersetzt wird, die den Drucker anweisen, sich jeweils über eine bestimmte Distanz zu bewegen, wobei er Kunststoff ausgibt oder nicht, bis eine ganze Schicht fertig ist. Anschließend wird die Z-Achse auf die nächste Schicht bewegt und der Prozess beginnt von Neuem. Dieser Code wird als »G-Code« bezeichnet. Viele Slicer fügen automatisch Stütz- und Fundamentelemente ein, ebenso wie automatische Füllmuster, um möglichst wenig Kunststoff für einen Ausdruck zu benötigen.



## *3D-Druck für Dummies*



*Kalani Kirk Hausman und Richard Horne*

# *3D-Druck für Dummies*

*Übersetzung aus dem Amerikanischen von  
Judith Muhr*

**WILEY**

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

**Bibliografische Information  
der Deutschen Nationalbibliothek**

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

1. Auflage 2014

© 2014 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

Original English language edition »3D Printing For Dummies« ©2014 by John Wiley & Sons, Inc.,  
Hoboken, New Jersey

All rights reserved including the right of reproduction in whole or in part in any form. This translation published by  
arrangement with John Wiley and Sons, Inc.

Copyright der englischsprachigen Originalausgabe »3D Printing For Dummies« ©2014 by John Wiley & Sons, Inc.,  
Hoboken, New Jersey

Alle Rechte vorbehalten inklusive des Rechtes auf Reproduktion im Ganzen oder in Teilen und in jeglicher Form.  
Diese Übersetzung wird mit Genehmigung von John Wiley and Sons, Inc. publiziert.

Wiley, the Wiley logo, Für Dummies, the Dummies Man logo, and related trademarks and trade dress are trademarks  
or registered trademarks of John Wiley & Sons, Inc. and/or its affiliates, in the United States and other countries.  
Used by permission.

Wiley, die Bezeichnung »Für Dummies«, das Dummies-Mann-Logo und darauf bezogene Gestaltungen sind Marken  
oder eingetragene Marken von John Wiley & Sons, Inc., USA, Deutschland und in anderen Ländern.

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren und Verlag für die Richtigkeit von  
Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie eventuelle Druckfehler keine Haftung.

Printed in Germany

Gedruckt auf säurefreiem Papier



Coverfoto: © nahariyani – Shutterstock.com

Korrektur: Geesche Kieckbusch, Hamburg

Satz: SPi Global, Chennai

Druck und Bindung: CPI - Ebner & Spiegel, Ulm

**Print ISBN:** 978-3-527-71030-0

**ePDF ISBN:** 978-3-527-68768-8

**ePub ISBN:** 978-3-527-68766-4

**mobi ISBN:** 978-3-527-68767-1

# Cartoons im Überblick

von Christian Kalkert



Seite 21



Seite 75



Seite 113



Seite 155



Seite 209





# Inhaltsverzeichnis

<b>Einführung</b>	<b>17</b>
Über dieses Buch	17
Törichte Annahmen	17
Symbole in diesem Buch	18
Wie dieses Buch aufgebaut ist	19
Teil I: 3D-Druck – die ersten Schritte	19
Teil II: 3D-Druckressourcen	19
Teil III: Die kommerzielle Seite des 3D-Drucks	19
Teil IV: 3D-Drucker für Privatpersonen	19
Teil V: Einen RepRap-3D-Drucker bauen	19
Teil VI: Der Top-Ten-Teil	19
Wie es weitergeht	20
 <b>Teil I</b>	
<b>3D-Druck – Die ersten Schritte</b>	<b>21</b>
 <b>Kapitel 1</b>	
<b>Wie 3D-Drucker zur modernen Fertigung passen</b>	<b>23</b>
Additive Fertigung – Einführung	24
Definition der additiven Fertigung	25
Der Vergleich mit der traditionellen Fertigung	26
Die Vorteile der additiven Fertigung verstehen	30
Anwendungen des 3D-Drucks	35
Die Arbeit mit RepRap	35
 <b>Kapitel 2</b>	
<b>Verschiedene Arten des 3D-Drucks</b>	<b>37</b>
Die grundlegenden Formen der additiven Fertigung	38
Fotopolymer	38
Granulat	42
Laminierung	45
Schmelzschichtmodellierung (Fused Deposition Modeling, FDM)	47
Spezielle Formen der additiven Fertigung	48
Fertigung mit unterschiedlichen Materialien	48
Farbdruck	49
Grenzen der aktuellen Technologien	51
Produktionsgeschwindigkeiten	51
Größenbeschränkungen	51
Einschränkungen des Objektdesigns	52
Materialeinschränkungen	53

## **Kapitel 3**

### **Anwendungen für den 3D-Druck**

**55**

Objekte direkt per 3D-Druck erstellen	56
Schnelles Prototyping	56
Direkte digitale Fertigung	58
Wiederherstellung und Reparatur	59
Die Fertigung von Morgen – 3D-Druck	61
Haushaltswaren	62
Gebäude	62
Vollständiges Recycling	64
Formen und Gießen mit 3D-Druck	66
Verlorene Formen	66
Gesinterte Metalleinbringung	67
Künstlerische Noten und Personalisierung	67
Medizinische Implantate	67
Personalisierung von Objekten	68
Kleidung und Textilien	69
Bereitstellung von Technologie an strategischen Standorten	70
Militärische Fertigung	71
Im Weltraum	72

## **Teil II**

### **Ressourcen für den 3D-Druck**

**75**

## **Kapitel 4**

### **Materialien für den 3D-Druck**

**77**

Extrudierte stranggepresste Materialien	78
Thermoplaste	78
Experimentelle Materialien	83
Extrudierte Alternativen	84
Granulat	85
Kunststoffpulver	85
Zucker und Salz	86
Metallpulver	86
Sand und natürliche Granulate	88
Lichtgehärtete Harze	88
Bioprinting	89
Bioprinting für Lebensmittel und tierische Produkte	90
Ersatz für Gewebe und Organe	91
Alternative Materialien	91
Recycelte Materialien	92
Nahrungsmittelhaltbarkeit	93
Versorgung von Menschen	94

## Kapitel 5

### Quellen für 3D-Druck-Objekte 95

Objektverzeichnisse	95
Verzeichnisse von Anbietern	96
Community-Verzeichnisse	97
Design auf dem Computer	99
Objekte einscannen	102
Strukturen aus Fotos erfassen	105
Vorbereitung von Modellen auf den Druck	109
3D-Modell-Viewer	109
Mesh-Modellierer	110
Mesh-Reparaturwerkzeuge	111

## Teil III

### Die gewerbliche Seite des 3D-Drucks 113

## Kapitel 6

### Ausrichtung des 3D-Drucks an die Marktanforderungen 115

Demokratisierung der Herstellung	115
Abgeleitete Designs	116
Kunstgegenstände aus Museen	116
Modelle erstellen	117
Private Shops	120
Ein einzigartiges Design	121
Herstellung eines einmaligen Produkts auf Anforderung	123
Unmögliche Objekte	124
Neue Tools	126
Mehr als nur massive Bausteine	126
Ein Werkzeug für ein Werkzeug	127

## Kapitel 7

### Auswirkungen des 3D-Drucks auf herkömmliche Geschäftsbereiche 131

Umwandlung der Fertigung	131
Verlagerung der Produktionslinien	132
Verkürzung der Fertigungskette	134
Lokale Fertigung	135
Wegfall traditioneller Freigabezyklen	135
Probleme mit dem geistigen Eigentum	136
Bedrohter Schutz des geistigen Eigentums	137
Übertragung der gesetzlichen Haftung	139
Nutzung abgelaufener Patente	140
Innovationen in Bezug auf geistiges Eigentum	141
Schutz der Rechte auf geistiges Eigentum	142
Ethische Kontrollen	142

**Kapitel 8****3D-Druck–Forschungsübersicht****145**

Grundlegende Technologien	145
Werkzeuge für den Unterricht	145
Die 3D-Druckoptionen erweitern	147
3D-gedruckte Elektronik	148
Funktionale Designs schaffen	148
Drohnen, Roboter und militärische Anwendungen	149
Von-Neumann-Maschinen	150
Erweiterte Materialauswahl	151
Ausstattung langer Weltraummissionen	152
Möglichkeiten in der Medizin	154

**Teil IV****Private 3D-Drucker verwenden****155****Kapitel 9****3D-gedruckte Kunst****157**

Ziergegenstände für den Körper	157
Individualisierung der Umgebung	158
Die eigene Kreativität wiederentdecken	159
Abstraktes visualisieren	162

**Kapitel 10****3D-Drucker für den Verbraucher****167**

3D-Drucker mit kartesischem System	167
Delta-Optionen	171
Fertigung unter Verwendung von Polarkoordinaten	174
In Entwicklung befindliche Varianten	176

**Kapitel 11****Ein RepRap für Sie****179**

Ihre Anforderungen an einen 3D-Drucker	179
Brauche ich einen RepRap oder einen anderen Drucker?	180
Kaufe ich einen fertigen 3D-Drucker oder einen Bausatz?	181
Offen, geschlossen und unter Lizenz	182
Auswahl eines 3D-Drucker-Designs	184
RepRap-Designs	184
3D-Drucker-Bausätze für den Privatgebrauch	189
Die experimentellen Designs	192
Weitere Maschinenkonstellationen	193



Auswahl des Druckmediums	193
Thermoplast	193
PLA/PHA-Kunststoff	194
ABS	198
Paste	198
Bauteile	200
Der Rahmen	200
Der Extruder	200
Druckplatte	203
Steuerelektronik	205
Software	205
 <b>Teil V</b>	
<b>Einen RepRap-3D-Drucker bauen</b>	<b>209</b>
 <b>Kapitel 12</b>	
<b>Montage der Bauelemente</b>	<b>211</b>
Materialien finden	211
Bausätze	211
Eigenbeschaffung	214
Selbst drucken	214
eBay	215
Druckteile für die Montage der Maschine	215
Die Bewegung der Maschine verstehen	215
Bewegung entlang der Z-Achse	216
Bewegung entlang der X- und Y-Achse	220
Bau der Rahmenstruktur	222
Montage des Y-Achsen-Rahmens für den Prusa i3	227
Montage der beweglichen Achse	228
Montage der beweglichen Y-Achse des Prusa i3	231
Montage der beweglichen Z- und Y-Achsen des Prusa i3	233
Verbindung der Z-, X- und Y-Achsen	236
Die Home-Position einstellen	236
 <b>Kapitel 13</b>	
<b>Die Steuerelektronik des RepRap</b>	<b>239</b>
RepRap-Elektronik – ein Überblick	239
RAMPS	240
RAMBo	240
Sanguinololu	241
Minitronics	241
RUMBA	242

Elefu-RA V3	243
Megatronics	243
Elektronik für Ihren RepRap-3D-Drucker	245
Montagevorbereitung für die Elektronik	246
Modulare Komponenten, Sensoren und Motoren	253
Drucken ohne Computer	253
Motor-Antriebsmodule	253
Auswahl der Module für die Positionssensoren	256
Die erforderliche Stromversorgung	257
Lüfter und Beleuchtung	260
Verdrahtung und Anschlüsse bei RepRap-Druckern	262
Firmware-Konfiguration	263
Firmware-Konfiguration für den Prusa i3	265
Die Marlin-Firmware in die RAMPS-Elektronik hochladen	270

## **Kapitel 14**

### **Montage des RepRap-Extruders und Aufrüstung des RepRap-Druckers 273**

Thermoplast-Extrusion	273
Montage des Extruders und des Hot-Ends für den Prusa i3	279
Anbau des Faden-Fördermechanismus an die Motorwelle	280
Montage des Zwischenraddrucklagers für den Extruderantrieb	281
Anbringung des J-Kopf-Hot-Ends	281
Anbau des montierten Extruders am X-Wagen	282
Verdrahtung des Extruders an die RAMPS-Elektronik	282
Spritzen- und pastenbasierte Extrusion	283
Mehrfarbige Drucke	286
Betrieb und Upgrades des Extruders	292
Ein blockiertes Hot-End oder einen Extruder reparieren	293
Ein Extrudersortiment beschaffen	295
Extruder mit Lüftern kühlen	297

## **Kapitel 15**

### **Software und Kalibrierung 301**

Software für das 3D-Design und Modellressourcen	301
Design-Software	306
Überprüfung von Modellen mit netfabb	308
Slic3r	308
Slic3r konfigurieren	310
Modellverarbeitung mit Slic3r	313
Den 3D-Drucker kalibrieren	320
Nivellierung der Druckplatte	322
Einstellung der Hot-End-Temperaturregelung	323
Kalibrierung der Extruderdistanz	323

3D-gedruckte Objekte	327
Vasen, Töpfe und Tassen drucken	331
Große einteilige Objekte drucken	333
Winzige oder stark detaillierte Objekte drucken	334
Viele Objekte gleichzeitig drucken	335
Verbesserung der Druckqualität	335
<b>Teil VI</b>	
<b>Der Top-Ten-Teil</b>	<b>337</b>
<b>Kapitel 16</b>	
<b>Zehn Möglichkeiten, wie das schnelle Prototyping die traditionelle Fertigung verändern wird</b>	<b>339</b>
Schnelle Marktreife	339
Abschaffung der Massenproduktion	339
Verschiebung des Transportsektors	340
Verbrauch alternativer Materialien	340
Geringerer Materialbedarf	341
Umweltfreundlichkeit	341
Verschleiß vermeiden	341
Wegfall der Universalanfertigungen	342
Herstellen, was Sie wollen	343
Alles, was man zum Leben braucht	344
<b>Kapitel 17</b>	
<b>Zehn Beispiele für direkte digitale Herstellung und Personalisierung</b>	<b>345</b>
3D-gedruckte Lebensmittel	345
Druck von Gewebe und Organen	345
Biologische Repliken	346
Herstellung von Kleidung und Schuhen	346
Personalisiertes Kunsthandwerk	347
Hollywood wird noch spektakulärer	347
Baukörper erstellen	347
Der Himmel ist nicht genug	348
Roboterbau	348
3D-Drucker drucken	349
<b>Kapitel 18</b>	
<b>Zehn unmögliche Designs, die mit der additiven Fertigung geschaffen wurden</b>	<b>351</b>
Personalisierte Objekte	351
Medizinische Implantate	351

Selbstreplizierende Roboter	351
Gedruckte Flugzeuge	352
Herstellung nach Bedarf und vor Ort	353
Benutzerdefinierte Objekte im Weltraum herstellen	353
Gedrucktes Finger-Food	353
Vor Ort hergestellte Objekte	353
Körperteile	354
Individuelle Medikamente	354

## ***Stichwortverzeichnis***

**355**

# Einführung

Anders als bei der herkömmlichen Fertigung, wo Material in eine vorgefertigte Form eingespritzt wird oder wo Material von massiven Blöcken des Ausgangsmaterials entfernt wird, geht die additive Fertigung (3D-Druck) von einem virtuellen 3D-Modell aus, das Schicht für Schicht in einen Festkörper umgewandelt wird. Eine Schicht baut jeweils auf der darunterliegenden Schicht auf, sodass ein Festkörper entsteht, der das virtuelle 3D-Modell in all seiner Komplexität und bis ins kleinste Detail darstellt, ohne dass zusätzliche Formen oder Bearbeitungen und Behandlungen erforderlich sind, wie es bei traditionellen Fertigungen der Fall ist.

3D-Drucker gibt es schon seit mehreren Jahren, aber erst seit Kurzem sind sie zu einem Preis erhältlich, den sich auch die meisten privaten Anwender leisten können. Sie werden immer gebräuchlicher, und weil Innovationen in diesem Technologiebereich jetzt die Erstellung von Produkten aus den unterschiedlichsten Materialien gestatten (und sogar aus Kombinationen verschiedener Materialien), wird der 3D-Druck die Durchschnittsverbraucher maßgeblich beeinflussen. *3D-Druck für Dummies* wurde für den Durchschnittsleser geschrieben. Es bietet einen Überblick darüber, welche Möglichkeiten die additive Herstellung heute bietet, und dies für private und kommerzielle Zwecke, und es zeigt Möglichkeiten für die Zukunft auf.

## Über dieses Buch

In diesem Buch stellen wir viele verschiedene Technologien vor, die derzeit für die additive Fertigung angeboten werden. Dabei wird eine der ersten Generationen dieser Technologie betrachtet, bei welcher noch zahlreichen Einschränkungen und Vorsichtsmaßnahmen für die Verwendung und Auswahl der für den Einsatz mit 3D-Druckern verfügbaren Materialien zu beachten sind, sowohl für kommerzielle als auch für private Zwecke. Darüber hinaus zeigen wir, wie Sie sich einen eigenen 3D-Drucker bauen können, nämlich unter Verwendung der als Open Source bereitgestellten RepRap-Designfamilie (Self-REplicating RAPid-Prototyping). Damit werden Sie nicht nur zum Fachmann in allen Bereichen des 3D-Drucks, sondern Sie erhalten auch die Gelegenheit, die vielen verschiedenen Typen additiver Fertigungssysteme kennenzulernen. Hoffentlich sind auch Sie beeindruckt von dem überwältigenden Potenzial, das 3D-Drucker bieten – so beeindruckt, dass Sie Ihren eigenen Drucker bauen und Ihre Kreativität mit Ihren Freunden und Ihrer Familie teilen!

## Törichte Annahmen

Womöglich können Sie gar nicht glauben, dass wir Annahmen über Sie getroffen haben. Schließlich haben wir Sie noch nie getroffen! Die meisten Annahmen sind zwar wirklich töricht, aber wir mussten ja irgendwo anfangen, um einen Ausgangspunkt für dieses Buch zu finden.

Sie sollten sich im Klaren darüber sein, dass das aktuelle Komplexitätsniveau im Bereich der 3D-Drucker vergleichbar ist mit dem der ersten automatisierten Webstühle, die Anfang



des 18. Jahrhunderts ihren Weg in die Fabriken fanden. Kommerzielle 3D-Drucker sind nicht sehr unterschiedlich, aber für die Ausrüstung für den privaten Nutzer werden immer wieder »Basteleien« benötigt, damit alles funktioniert. Die Arbeit mit 3D-Druckern ist sehr lohnend, aber Sie sollten wissen, wie Sie Ihren Drucker zuhause oder im Büro selbst einstellen und anpassen müssen und dass Sie ihn selbst reparieren müssen, wenn irgendetwas schrecklich schiefgeht. Sie müssen kein erfahrener Heimwerker sein, aber eine gewisse Vertrautheit mit den wichtigsten Werkzeugen ist durchaus hilfreich, wenn Sie Ihren eigenen 3D-Drucker bauen, montieren oder benutzen.

Das Buch setzt voraus, dass Sie Programme in einem Webbrowser herunterladen oder darauf zugreifen können, wenn Sie die Anwendungen ausprobieren wollen, die wir in diesem Buch vorstellen, wie beispielsweise TinkerCAD. Sie müssen jedoch keinen eigenen Computer besitzen, um mit diesem Buch Spaß haben zu können. Alles, was Sie brauchen, ist ein wenig Neugier und Interesse für zukunftssträchtige Technologien und dafür, was mit der additiven Fertigung hergestellt werden kann.

### Symbole in diesem Buch

Während Sie dieses Buch lesen, werden Ihnen an den Seitenrändern immer wieder Symbole auffallen, die Sie auf (vielleicht mehr oder weniger) interessante Dinge hinweisen. Dieser Abschnitt beschreibt kurz die Symbole in diesem Buch.



Tipps sind praktisch, weil sie Ihnen helfen, Zeit zu sparen oder bestimmte Aufgaben ohne erheblichen Zusatzaufwand zu erledigen. Die Tipps in diesem Buch stellen Ihnen zeitsparende Techniken vor oder geben Hinweise auf Ressourcen, die Sie einsetzen können, um den maximalen Nutzen aus dem 3D-Druck zu ziehen.



Wir möchten nicht die Rolle strenger Eltern oder anderer Psychopaten einnehmen, aber Dinge, die mit einem Warnsymbol gekennzeichnet sind, sollten Sie tunlichst vermeiden.



Wenn Sie dieses Symbol sehen, kommen *fortgeschrittene* Tipps oder Techniken. Manchmal werden Ihnen diese kleinen Informationseinschübe völlig langweilig erscheinen, manchmal enthalten sie genau die Lösung, die Sie brauchen. Wenn Sie möchten, können Sie diese Absätze jederzeit überspringen.



Auch wenn Sie sonst nichts aus einem Kapitel oder einem Abschnitt für sich mitnehmen können, sollten Sie sich die Dinge merken, die mit diesem Symbol gekennzeichnet sind. Dieser Text enthält in der Regel Hinweise auf wichtige Verfahren oder Informationen, die Sie einfach wissen müssen.

## *Wie dieses Buch aufgebaut ist*

Wir unterteilen dieses Buch in mehrere Teile, wo es jeweils um unterschiedliche Themen geht. Die folgenden Abschnitte beschreiben, was Sie in den einzelnen Teilen erwartet.

### *Teil I: 3D-Druck – die ersten Schritte*

Teil I beschäftigt sich mit grundlegenden Technologien für den 3D-Druck sowie mit Optionen für die additive Fertigung nach dem aktuellen Stand der Technik. Er soll Ihnen einen allgemeinen Überblick verschaffen, was die additive Fertigung heute leistet.

### *Teil II: 3D-Druckressourcen*

Teil II erweitert Ihre Kenntnisse über die additive Fertigung und Sie lernen unterschiedliche Materialien kennen, die heute und in naher Zukunft für 3D-Drucktechnologien verwendet werden können. Sie erfahren, welche Möglichkeiten es gibt, neue virtuelle 3D-Objektmodelle zu erstellen und zu drucken.

### *Teil III: Die kommerzielle Seite des 3D-Drucks*

Teil III untersucht die potentiellen Probleme für bestehende Unternehmen sowie neue Geschäftsfelder, die durch die additive Fertigung entstehen. Darüber hinaus geht es um aktuelle Forschungen, die neue Optionen für den aktuellen Stand der Technik schaffen.

### *Teil IV: 3D-Drucker für Privatpersonen*

Teil IV stellt 3D-Drucker-Optionen für den Verbraucher vor, kommerzielle und Open Source-Varianten für den Privatgebrauch und kleine Unternehmen, die es Ihnen ermöglichen, kreative und künstlerische Designs zu erstellen und all diese wunderbaren neuen Möglichkeiten auszuprobieren. Wir werden die Dinge ansprechen, die Sie berücksichtigen sollten, wenn Sie Ihren eigenen RepRap-3D-Drucker bauen.

### *Teil V: Einen RepRap-3D-Drucker bauen*

In Teil V erfahren Sie, wie Sie einen RepRap-Drucker entwerfen, montieren und kalibrieren.

### *Teil VI: Der Top-Ten-Teil*

Teil VI enthält Listen mit jeweils zehn interessanten, revolutionären oder (in der herkömmlichen Fertigung) unmöglichen Anwendungen, die die additive Fertigung möglich macht.

## *Wie es weitergeht*

Ziel dieses Buchs ist es, Ihnen Informationen über den 3D-Druck bereitzustellen und zu zeigen, welches Potenzial er für Ihr eigenes Leben bietet, sei es zuhause oder in Ihrem Job. Wir stehen am Anfang eines neuen Industriezeitalters, die traditionelle Fertigung wird immer weiter verschwinden und Platz machen für die personalisierte, individualisierte, umweltfreundliche und nachfragebestimmte Fertigung in der Nähe des Verbrauchers. Sie brauchen dieses Buch nicht von hinten nach vorne durchzulesen, aber wir glauben, Sie werden auf jeder Seite hochinteressante Informationen finden. In jedem Fall hoffen wir, dass Sie daraus Dutzende Ideen für Verbesserungen, Verwendungszwecke und neue Möglichkeiten mitnehmen, die durch die Verbreitung von 3D-Druckern möglich werden.

## *Teil I*

# *3D-Druck – Die ersten Schritte*



## ***In diesem Teil ...***

- ✓ Lernen Sie die Welt des 3D-Drucks kennen – mit vielen verschiedenen Arten der additiven Fertigung und ihrer Anwendung.
- ✓ Erfahren Sie, wofür das ständig zunehmende Spektrum der heute verfügbaren 3D-Druck-Varianten eingesetzt wird.
- ✓ Erfahren Sie mehr über die Varianten, die bereits für den 3D-Druck existieren.
- ✓ Entdecken Sie Möglichkeiten, wie Sie die additive Fertigung für private und berufliche Aufgaben nutzen können.

# Wie 3D-Drucker zur modernen Fertigung passen



## In diesem Kapitel

- ▶ Additive Fertigung kennenlernen
- ▶ Additive Fertigung definieren
- ▶ Vergleiche zur traditionellen Fertigung ziehen
- ▶ Recycling und geplante Veralterung berücksichtigen
- ▶ Die Anwendung des 3D-Drucks genauer betrachten

---

Im Bereich der Fertigung finden derzeit erstaunliche Umbrüche statt. Dies betrifft fast alle Produkte, und diese Wandlung verspricht, unsere Zukunft zu einer nachhaltigen und an das einzelne Individuum angepassten Umgebung zu machen. Diese Zukunft steht vor der Tür, und alles, was wir brauchen, kann mit minimalem Abfallaufkommen schnell ersetzt oder neu erstellt werden – von Nahrungsmitteln bis hin zu unseren eigenen Körpern. Wir sprechen hier nicht von langsamen Änderungen durch Fortschritt, wie beispielsweise bei einer iPhone-Generation zur nächsten, sondern von einer wirklichen Revolution, vergleichbar mit den Änderungen, die das industrielle Zeitalter für die Welt mit sich gebracht hat, die nicht zuletzt dazu geführt haben, dass unsere Wohnungen und Unternehmen Licht und Strom erhalten haben.

Diese Entwicklung wird nicht ohne Verluste vonstattengehen. Alle wirklich grundlegenden Änderungen, die sich auf alle Bereiche der weltweiten Wirtschaft erstrecken, sind ihrer Natur nach zerstörerisch. Mit Sicherheit werden die ineffizienten herkömmlichen Methoden verschwinden, um das jeweils nächste Modell irgendeines Produktes herzustellen, und den neuen Methoden Platz machen, von denen man bisher nur träumen konnte. Die Technologie hinter dieser Wandlung wird auch als *additive Fertigung*, *3D-Druck* oder *direkte digitale Fertigung* bezeichnet.

Aber egal, wie wir diese Technologie bezeichnen, sie wird bereits im nächsten Jahrzehnt genutzt werden, um alles Mögliche zu bauen, wie beispielsweise Motoren, Flugzeuge, Lebensmittel und sogar Gewebe und Organe aus Zellen! Tagtäglich werden überall auf der Welt neue Anwendungsformen für den 3D-Druck entdeckt und entwickelt. Und selbst der Weltraum ist nicht ausgeschlossen: Die NASA testet Entwürfe, die ohne Schwerkraft und auf dem luftfreien Mond funktionieren und sogar die Erkundung anderer Planeten durch den Menschen unterstützen, wie beispielsweise des Mars (wie das aussehen könnte, sehen Sie in Abbildung 1.1). Machen Sie sich auf einiges gefasst, denn in den nächsten Kapiteln werden

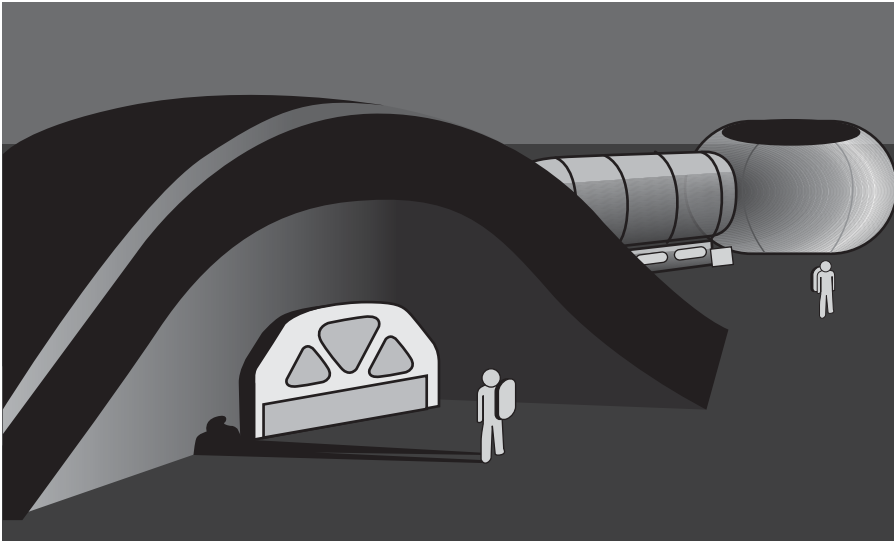


Abbildung 1.1: Eine Zeichnung eines von der NASA in 3D-Druck auf dem Mond geplanten Gebäudes

wir zahlreiche, unglaublich neue und fantastische Technologien vorstellen. Und wir werden Ihnen zeigen, wie Sie selbst an dieser unglaublichen Wandlung teilhaben können, indem Sie einen 3D-Drucker zuhause bauen und einsetzen.

### Additive Fertigung – Einführung

Jetzt fragen Sie sich vermutlich, was »additive Fertigung« ist. Additive Fertigung erinnert ein wenig an die »Replikatoren« aus *Star Trek*, über die der Captain einen »Tee, Earl Grey, heiß« bestellen konnte, und dann tatsächlich eine Tasse mit einer entsprechenden Flüssigkeit erhielt, komplett fertig und trinkbereit. Wir sind noch nicht ganz so weit. Heute übernehmen 3D-Drucker die additive Fertigung, indem sie ein im Computer gespeichertes 3D-Modell eines Objekts in viele sehr dünne Schichten umrechnen und das Objekt dann Schicht für Schicht aufbauen und Material auftragen, bis das Objekt fertig für den Gebrauch ist.



3D-Drucker sind durchaus mit den uns vertrauten Druckern vergleichbar, die Sie bereits zuhause oder bei der Arbeit verwenden, um Kopien von Dokumenten zu erstellen, die auf elektronischem Wege übertragen oder auf Ihrem Computer erstellt wurden, außer dass ein 3D-Drucker ein dreidimensionales Objekt aus den unterschiedlichsten Materialien erzeugt, nicht nur einen einfachen Ausdruck auf Papier.

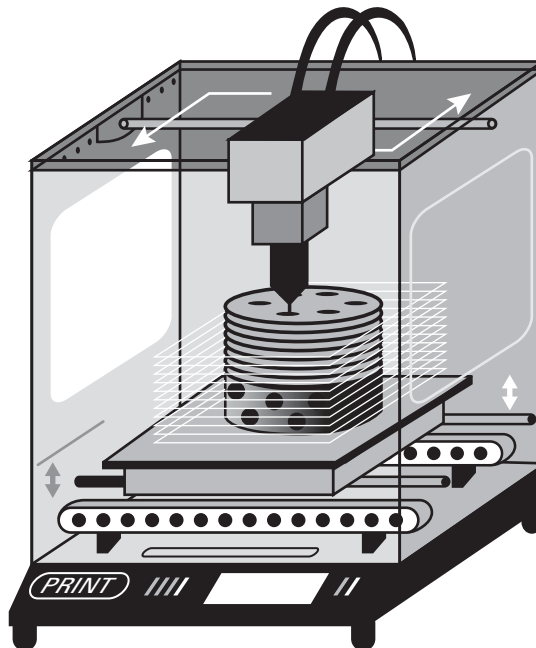
Seit Johannes Gutenberg hat die Möglichkeit, Dokumente mehrfach zu drucken, Bildung in die Welt gebracht. Wenn Sie heute in einer Textverarbeitung auf die DRUCKEN-Schaltfläche

klicken, übernehmen Sie die Arbeit von Schriftstellern, Stenografen, Korrektoren, Layoutern, Belichtern (Farbgebung und Einfügen von Bildern) und Druckern innerhalb eines einzigen Arbeitsschritts. Und mit ein paar weiteren Klicks veröffentlichen Sie das von Ihnen erstellte Dokument im Internet, wo es von anderen Menschen auf der ganzen Welt geteilt, heruntergeladen und ausgedruckt werden kann.

Der 3D-Druck bewirkt genau dasselbe für Gegenstände: Designs und virtuelle 3D-Modelle für physische Objekte können geteilt, heruntergeladen und dann in physischer Form ausgedruckt werden. Nicht auszudenken, was Johannes Gutenberg daraus gemacht hätte.

### *Definition der additiven Fertigung*

Warum heißt die additive Fertigung »additiv«? Bei der additiven Fertigung wird das Design eines Objekts – seine Form – in ein Computermodell umgewandelt. Anschließend wird das Modell in einzelne Schichten zerlegt, die aufeinander gestapelt werden können, um schließlich das endgültige Objekt zu bilden. Damit wird ein dreidimensionales Objekt als Folge aufeinander stapelbarer Schichten neu dargestellt, die, wenn sie zusammengefügt werden, schließlich das fertige Objekt ergeben (siehe Abbildung 1.2). Ob es sich bei diesem Objekt um eine Teetasse oder ein Haus handelt – der Prozess beginnt immer bei der untersten Schicht und baut alle weiteren Schichten darauf auf, bis das komplette Objekt fertiggestellt ist.



*Abbildung 1.2: Eine Zeichnung in 2D, wie der 3D-Druck funktioniert*



Unsere Kinder konnten das schon, bevor sie ihren ersten 3D-Drucker überhaupt zu Gesicht bekommen haben. Sie entdeckten nämlich, dass sie mithilfe von Kräckern und Sprühkäse mehr als nur einen Snack basteln konnten. Sie bauten ganze Türme und riesige Konstruktionen, indem sie einfach nur Kräcker und Käse aufeinanderschichteten. Diese essbaren Bauwerke zeigen das Potenzial der additiven Fertigung. Auf jeden Kräcker wurde eine spezielle Sprühkäseschicht aufgetragen, um damit Namen zu schreiben, Zeichnungen anzufertigen und sogar Formen zu bilden und winzige Pyramiden zu stützen. Die resultierenden Mahlzeiten waren zum einen einzigartig und sahen außerdem genau so aus, wie sich das jeweilige Kind dies vorgestellt hatte.

3D-Drucker bauen die Materialschichten auf verschiedene Arten auf: Entweder schmelzen sie Flüssigkristallpolymere unter Verwendung eines Lasers, sie verbinden kleine Granulatkörnern unter Verwendung eines Lasers oder eines flüssigen Bindematerials oder sie spritzen geschmolzenes Material aus (man sagt dazu »extrudieren«), ähnlich wie Zahncreme aus der Tube auf eine Zahnbürste. 3D-Drucker erledigen ihre additive Fertigung jedoch unter Verwendung von sehr viel mehr Material als nur Zahncreme oder Sprühkäse. Sie können Gegenstände aus lichtaushärtenden Kunststoffpolymeren, geschmolzenem Kunststoffaden (»Filament«), Metallpulvern, Beton und vielen anderen Materialtypen herstellen – unter anderem auch aus biologischen Zellen, die atemberaubend komplexe Strukturen annehmen können, mit denen wir in unserem Körper Austausch-, Reparatur- und sogar Erweiterungsarbeiten vornehmen können.

So wie die Jahresringe eines Baums die additiven Wachstumsschichten des Baums für jedes einzelne Jahr zeigen, so baut auch die additive Fertigung Gegenstände Schicht für Schicht auf. Auf diese Weise können wir ein kleines Plastikspielzeug, ein ganzes Auto und sehr bald ein ganzes Haus (mit allen Möbeln) oder sogar komplette Flugzeuge mit allen ihren Steuerungen herstellen. Die Forschung im Bereich der Leitermaterialien kann heute bereits zeigen, dass auch Verdrahtungen bald Bestandteil des additiven Fertigungsprozesses sein werden, indem sie einfach nur auf ein Objekt aufgedruckt werden, statt sie später installieren zu müssen.

## ***Der Vergleich mit der traditionellen Fertigung***

Wie lässt sich die additive Fertigung mit den traditionellen Fertigungsmethoden vergleichen, die nach der ersten industriellen Revolution im 18. Jahrhundert die Fertigung von der manuellen Herstellung in eine automatisierte Produktion umgewandelt haben, indem maschinelle Werkzeuge unter Verwendung von Wasser und Dampf angetrieben wurden? Warum brauchen wir einen weiteren marktverändernden Technologiewechsel, nachdem die zweite industrielle Revolution im 19. Jahrhundert die Welt durch die zunehmende Nutzung von dampfbetriebenen Fahrzeugen und Firmen mit Massenproduktion verändert hat? Heute stehen wir unmittelbar vor der nächsten Transformation, einer dritten industriellen Revolution, durch die die Massenproduktion und der weltweite Transport von Massenwaren abgeschafft werden und stattdessen eine lokal stattfindende und stark personalisierte, individuelle Produktion eingeführt wird, die zum Wandel der Gesellschaft in eine wirklich globale Phase der stetigen Selbstverbesserung und schrittweisen lokalen Innovation passt.

Die bahnbrechenden Neuerungen der ersten industriellen Revolution für die Gesellschaft waren so grundlegend, dass die Regierungen Gesetze erlassen mussten, um die inländischen Produktionsunternehmen von Wolltextilien in England gegenüber den neuen, aus Ostindien importierten maschinell gewebten Baumwolltextilien zu schützen. Dank der Spinnmaschine und der automatisierten Webstühle war es möglich geworden, dass ein paar wenige Menschen jede Woche hunderte Meter Stoff webten, während die Handweber monatelang brauchten, um Pflanzenfasern oder Schurwolle zu kardieren, das Material zu einem Faden zu spinnen und dann unzählige Fadenspulen zu ein paar Metern Stoff zu weben. Plötzlich machten diese neuen Industrietechnologien wie der automatisierte Webstuhl (siehe Abbildung 1.3) die Weber arbeitslos. Dies führte schließlich zur Gründung der Luddite-Bewegung, die versuchte, sich diesem Umwandlungsprozess zu widersetzen. In Deutschland gab es ähnliche Unternehmungen der sogenannten Maschinenstürmer. Glücklicherweise gewann letztendlich die Leistungsfähigkeit der neuen Technologien, ganze Familien mit Kleidung zu versorgen, diese Auseinandersetzung und änderte damit unsere Welt.

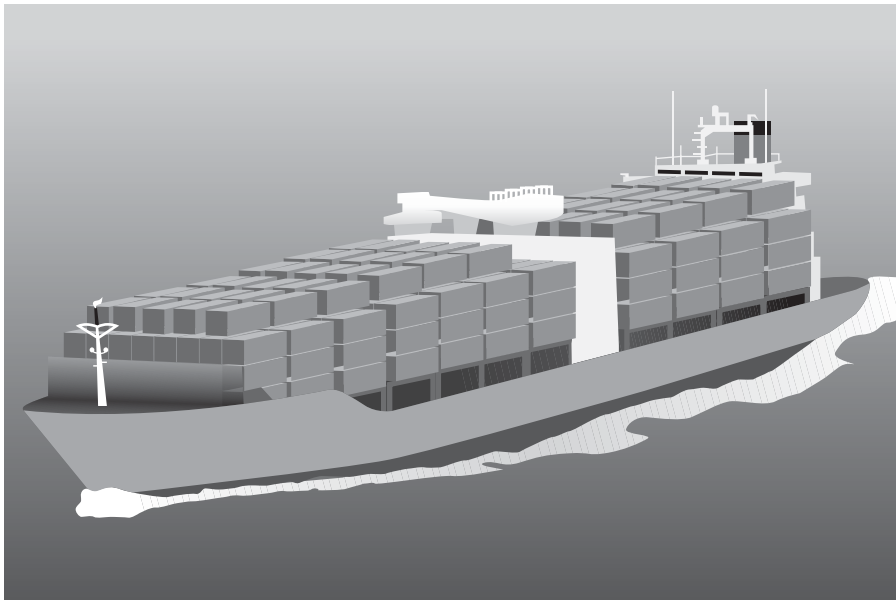


*Abbildung 1.3: Ein Beispiel aus den vergangenen industriellen Revolutionen*

Die zweite industrielle Revolution, die die Gesellschaft ein paar Jahre später völlig veränderte, war noch deutlicher zu spüren, weil die Automatisierung Alternativen bot, die nicht mehr von der Kraft eines Menschen oder eines Pferdes abhängig waren. Die Dampfkraft befreite sogar riesige industrielle Einrichtungen von ihren Standorten an Flüssen und Wasserrädern und machte sie mobil. Die Schwierigkeiten, denen die Arbeiter angesichts dieser neuen Technologien gegenüberstanden, werden in der Geschichte des amerikanischen Volkshelden John Henry erzählt und sind heute noch in dem streitbaren Volkslied »The Ballad of John Henry« zu hören, der einen Wettkampf mit einem dampfbetriebenen Bohrhammer aufnahm, diesen auch gewann, aber dann an der Anstrengung starb. In diesem Lied und in vielen anderen, ähnlichen Liedern wurde die Frage gestellt, wie viel ein Mensch angesichts der Automatisierung noch wert sei. Die Tatsache, dass der dampfbetriebene Bohrhammer tagtäglich eingesetzt werden

konnte, ohne dass er Nahrung oder eine Pause brauchte, und dies noch lange, nachdem John Henry gestorben und vergessen war, erklärt, warum diese bahnbrechende Neuerung in den folgenden Jahren als Standard übernommen wurde.

Und heute, in Zeiten von neuen industriellen Umwälzungen, die eines Tages vielleicht als die dritte industrielle Revolution bezeichnet werden, ist das beträchtliche Potenzial der additiven Fertigung nicht mehr zu übersehen. Traditionelle Methoden der Massenproduktion sind im Extremfall relativ ineffizient. Für die Herstellung der Produkte sind zahlreiche aufwändige Schritte erforderlich. Zunächst werden die Rohmaterialien abgebaut, maschinell bearbeitet oder durch Formpressung hergestellt. Anschließend erfolgt ein Transport über die gesamte Welt, an Standorte, wo diese Materialien zu Komponenten weiterverarbeitet werden. Danach findet die Montage der Komponenten zu den Fertigprodukten statt, und dies in riesigen Stückzahlen, um die Stückkosten gering zu halten. Es folgt der Rücktransport der Produkte von weit entfernten Orten mit niedrigeren Fertigungskosten (und weniger strengen Arbeitsgesetzen für die Arbeitnehmer), die Einlagerung riesiger Produktmengen in riesigen Lagern und schließlich die Lieferung der Produkte an Großhändler und andere Vertriebsorganisationen, von denen aus sie schließlich die eigentlichen Verbraucher erreichen (siehe Abbildung 1.4).



*Abbildung 1.4: Für den Transport von traditionellen Massenfertigungsprodukten erforderlicher Frachttransport*

Aufgrund der entstehenden Kosten werden bei der traditionellen Fertigung Produkte hergestellt, die von so vielen Menschen wie möglich genutzt werden sollen, möglichst in einer universell passenden Form, anstatt sie an die Bedürfnisse der Verbraucher anzupassen und sie zu personalisieren. Damit ist die Flexibilität eingeschränkt, weil nicht vorhergesagt werden kann, welche Produkte nachgefragt werden, wenn das Folgemodell schon in den Geschäften

steht. Dieser Prozess ist außerdem unglaublich zeitaufwändig und vergeudet wichtige Ressourcen wie beispielsweise Erdöl, und die Umweltverschmutzung, die durch den Transport der Massengüter entsteht, ist problematisch für unseren Planeten.

### *Maschinelle/subtraktive Fertigung*

Mit der additiven Fertigung können komplette Produkte hergestellt werden – selbst Objekte mit ineinandergreifenden beweglichen Teilen, wie beispielsweise Lager in Rädern oder Ketten –, deshalb benötigen per 3D-Druck hergestellte Komponenten sehr viel weniger Be- und Verarbeitung als traditionell hergestellte Objekte. Der herkömmliche Ansatz nutzt *subtraktive* Fertigungsverfahren, wie beispielsweise Fräsen, Entspanen, Bohren, Falten und Polieren, um auch nur die Grundkomponenten eines Produkts herzustellen. Der herkömmliche Ansatz muss jeden Schritt des Fertigungsvorgangs berücksichtigen, selbst wenn dies so kleine Aufgaben sind, wie etwa ein Loch zu bohren, ein Stück Metall zu biegen oder eine gefräste Kante zu polieren, weil für jeden dieser Schritte ein Eingreifen durch den Menschen erforderlich ist und der Fließbandprozess entsprechend angepasst werden muss – wodurch weitere Kosten für das Endprodukt entstehen.



Das bedeutet natürlich auch, dass nach Abschluss dieser dritten industriellen Revolution weniger Maschinentechniker benötigt werden, aber auch, dass die Produkte sehr schnell und unter einem sehr viel geringerem Materialaufwand hergestellt werden können. Es ist sehr viel billiger, die Materialien nur dort anzubringen, wo sie gebraucht werden, statt mit ganzen Blöcken Rohmaterial zu beginnen und das gesamte nicht benötigte Material abzutragen, bis man zur endgültigen Form gelangt ist. Im Idealfall gestattet Ihnen der additive Prozess, 3D-gedruckte Produkte von Grund auf neu zu gestalten, sodass Sie gegebenenfalls komplexe offene Innenräume realisieren können, wodurch Material und Gewicht reduziert werden, während die Stärke beibehalten wird. Außerdem werden die additiv gefertigten Produkte komplett mit allen erforderlichen Löchern, Hohlräumen, Ebenen und Außenwänden erstellt, sodass viele Schritte der herkömmlichen Fertigung einfach wegfallen.

### *Formpressung/Spritzguss*

Herkömmliche langlebige Waren, wie beispielsweise die Komponenten für Autos, Flugzeuge oder Wolkenkratzer, werden hergestellt, indem in einer Gießerei geschmolzenes Metall in Formen gegossen oder durch Düsen ausgeblasen wird. Dieselbe Technologie wurde auch für die Fertigung von Kunststoffprodukten übernommen: Geschmolzener Kunststoff wird in Spritzgussformen zu dem gewünschten Endprodukt geformt. Durch die Formung von Materialien wie beispielsweise Glas können Fenster für vielfältig gestaltete Häuser angefertigt werden – wie beispielsweise für gigantische Türme aus Glas und Stahl, wie wir sie aus den Großstädten kennen.

Bei der herkömmlichen Formung mussten jedoch komplizierte Werkzeuge hergestellt werden, die eingesetzt wurden, um jeweils möglichst exakt gleiche Produkte herzustellen. Wollte man eine andere Variante des Produkts erstellen, brauchte man ein neues Werkzeug, was wiederum

einen zeitaufwändigen Prozess darstellen konnte. 3D-Drucker dagegen gestatten es, in großer Geschwindigkeit völlig neue Formen zu erstellen, sodass ein Hersteller schnell Anpassungen vornehmen kann, um neue Designanforderungen umzusetzen, der wechselnden Mode zu folgen oder andere gegebenenfalls erforderliche Änderungen vorzunehmen. Alternativ könnte ein Hersteller seine Produkte einfach direkt mit dem 3D-Drucker herstellen und das Design jeweils dynamisch anpassen, um individuelle Merkmale zu realisieren. Dieser direkte digitale Fertigungsprozess wird heute beispielsweise von GE verwendet, um 24.000 Düsenmotor-Kraftstoffbaugruppen jährlich herzustellen, ein Ansatz, der ganz einfach während des Prozesses abgeändert werden kann, wenn man irgendwann einen Designfehler erkennt. Man ändert das Design einfach nur im Computer und druckt die neuen Teile aus – wofür in einem traditionellen Massenfertigungsprozess völlig neue Werkzeuge hergestellt werden müssten.

## **Die Vorteile der additiven Fertigung verstehen**

Computermodelle und -designs können elektronisch übertragen oder zum Download über das Internet bereitgestellt werden, deshalb können die Hersteller es ihren Kunden dank der additiven Fertigung ermöglichen, ihre eigenen, personalisierten Versionen von Produkten zu entwerfen. In unserer vernetzten Welt ist die Fähigkeit nicht zu unterschätzen, in der Lage zu sein, Produkte schnell abzuändern, sodass sie für die unterschiedlichsten Kulturen und Klimazonen geeignet sind.

Ganz allgemein können die Vorteile der additiven Fertigung in die folgenden Kategorien eingeteilt werden:

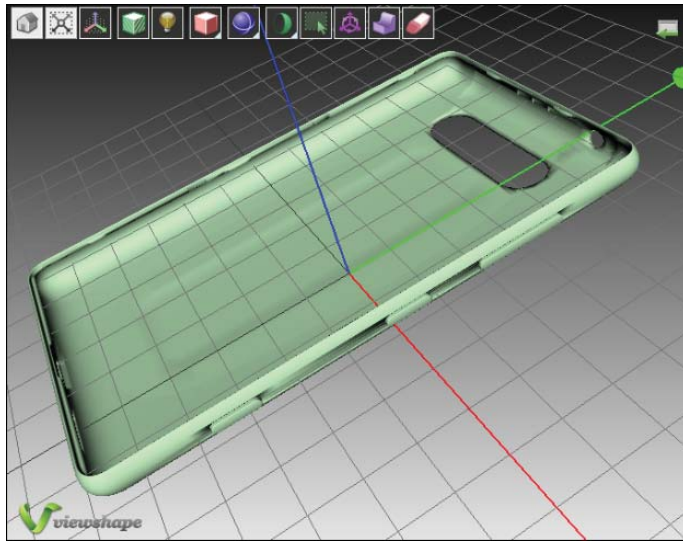
- ✓ Personalisierung
- ✓ Komplexität
- ✓ Nachhaltigkeit
- ✓ Recycling und geplante Veralterung
- ✓ Größenvorteile

In den nächsten Abschnitten soll es genauer um diese Vorteile gehen.

### **Personalisierung**

Personalisierung zum Zeitpunkt der Fertigung ermöglicht es, die Produkte aus der additiven Fertigung besser an die Anforderungen der einzelnen Kunden anzupassen – im Hinblick auf Form, Material, Design oder sogar Farbgebung, wie wir in späteren Kapiteln noch sehen werden.

Nokia beispielsweise hat vor Kurzem ein Gehäusedesign für sein Telefon Lumina 820 veröffentlicht, das mit einem 3D-Drucker hergestellt werden kann. Es steht unter Anwendung des Creative Commons-Lizenzierungsmodells zum kostenlosen Download zur Verfügung und kann beliebig angepasst werden (siehe Abbildung 1.5). Innerhalb kürzester Zeit haben die



*Abbildung 1.5: Das Telefongehäuse von Nokia, das kostenlos heruntergeladen und mit einem 3D-Drucker ausgedruckt werden kann*

Mitglieder der 3D-Druck-Community viele verschiedene Varianten dieses Gehäuses erstellt und auf Services wie beispielsweise Thingiverse im Angebot für 3D-Objekte veröffentlicht ([www.thingiverse.com/thing:43157](http://www.thingiverse.com/thing:43157)). Diese Verbesserungen wurden schnell zwischen den Mitgliedern der Community ausgetauscht, die sie nutzten, um weitgehend angepasste Varianten des Gehäuses zu erstellen. Durch diese Maßnahme hat Nokia in den Augen seiner Kunden deutlich an Wert gewonnen.



Creative Commons-Lizenzen sind verschiedene Copyright-Lizenzen, die von dem gemeinnützigen Unternehmen Creative Commons entwickelt wurden, um es Designern zu ermöglichen, anderen ihre Designs zur Verfügung zu stellen, sich bestimmte Rechte vorzubehalten und auf andere zu verzichten, sodass andere kreative Menschen ihre Designs nutzen und erweitern können, ohne dass komplizierte formelle Copyright-Lizenzierungen stattfinden müssen, wie es bisher für den Schutz von geistigem Eigentum erforderlich war.

### **Komplexität**

Die einzelnen Schichten eines Objekts werden nacheinander erstellt, deshalb ist es mit dem 3D-Druck möglich, komplexe interne Strukturen zu schaffen, die mit herkömmlich geformten oder gespritzten Teilen nicht möglich wären. Strukturen, die keine Last tragen, können beliebig dünne Wände haben, die auch komplett weggelassen werden können, wobei beim Druck an anderer Stelle zusätzliches stützendes Material eingefügt wird. Sind Stärke oder Steifigkeit erforderlich, während das Gewicht so gering wie möglich gehalten werden soll (wie

beispielsweise bei Rahmenelementen von Rennautos), kann die additive Fertigung teilweise ausgefüllte interne Hohlräume realisieren, ähnlich wie Bienenwaben, womit sich steife, leichte Alternativen realisieren lassen. Der Natur nachempfundene Strukturen, die (beispielsweise) die Knochen eines Vogels nachbilden, können mithilfe von additiven Fertigungstechniken hergestellt werden, um völlig neue Produkteigenschaften zu schaffen, die in der herkömmlichen Fertigung nicht möglich sind.

Wenn Sie überlegen, dass diese Technologie bald in der Lage sein wird, ganze Häuser mit der vollständigen Einrichtung zu erstellen, verstehen Sie auch, wie sich das Ganze auf einfachere Industriebereiche auswirken wird, wie beispielsweise Umzugsunternehmen. In der Zukunft ist es bei einem Umzug von einem Haus in ein anderes ausreichend, ein paar Kisten mit persönlichen Dingen mitzunehmen (Kinderzeichnungen, das alte Teeservice von Oma oder die ersten Babyschuhe). Irgendwann werden wir keine Umzugsunternehmen mehr benötigen. Wir beauftragen einfach ein Unternehmen, dasselbe Haus und dieselben Möbel (oder ein ähnliches mit ein paar neuen Extras) an dem neuen Standort herzustellen. Dasselbe Unternehmen könnte Materialien wiederverwenden, die im vorherigen Haus oder bei den vorherigen Möbeln verwendet wurden – ein vollständiges Recycling.

### Nachhaltigkeit

Durch die Variation von Stärke und Flexibilität innerhalb eines Objekts können per 3D-Druck hergestellte Komponenten das Gewicht von Produkten reduzieren und Kraftstoff sparen – beispielsweise könnte ein Flugzeughersteller durch den Neuentwurf seiner Sicherheitsgurtschlösser schätzungsweise zehntausende Liter Flugbenzin über die Gesamtlebensdauer eines Flugzeugs einsparen. Und weil Material nur dort angebracht wird, wo es benötigt wird, kann die additive Fertigung sehr viel Material einsparen, das bei der Nachbearbeitung entfernt werden würde, sodass weniger Geld und weniger Ressourcen aufgewendet werden müssen.



Die additive Fertigung gestattet außerdem die Verwendung der unterschiedlichsten Materialien für verschiedene Komponenten, selbst bei dem geschmolzenen Kunststoff, der in Druckern verwendet wird, wie dem RepRap-Gerät, das Sie später in diesem Buch noch kennenlernen werden. Für den privaten 3D-Druck wird häufig ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol) verwendet, dessen Eigenschaften uns aus der Herstellung von Spielzeug wie beispielsweise LEGO-Steinen bekannt ist. Es handelt sich dabei jedoch um einen auf Erdöl basierenden Kunststoff. Umweltbewusste Anwender sollten stattdessen pflanzliche Alternativen einsetzen, wie beispielsweise PLA (Polylactide), mit denen ähnliche Ergebnisse erzielt werden können. Alternativen wie PLA werden häufig aus Getreide oder Rüben hergestellt. Heute werden zahlreiche Forschungen im Hinblick auf die Produktion von für die Industrie ausreichenden Mengen dieses Materials aus Algen unternommen, was uns eines Tages von der Abhängigkeit von erdölbasierten Kunststoffen befreien wird.

Und es können darüber hinaus noch weitere Materialien – selbst Rohstoffe – verwendet werden. Einige 3D-Drucker können Objekte aus Beton oder sogar Sand als Rohmaterial



drucken! Markus Kayser, der Erfinder des Solar Sinter, wandelt nur unter Verwendung von Sonnenenergie, die er durch eine Linse bündelt, Sand in Objekte und sogar Baukörper um. Kayser setzt dazu ein computergesteuertes System ein, um das gebündelte Sonnenlicht präzise zu lenken und Sandgranulat zu einer harten Glasform zu schmelzen, die er schichtweise aufbringt, um Schalen und andere Objekte zu erstellen (siehe Abbildung 1.6).



*Abbildung 1.6: Eine Naturglas-Schale, geformt mithilfe von Sonnenlicht, mit dem der Solar Sinter Sand einschmilzt  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von Markus Kayser)*

### **Recycling und geplante Veralterung**

Die dritte industrielle Revolution bietet eine Möglichkeit, das herkömmliche Konzept der geplanten Veralterung abzuschaffen, das hinter dem aktuellen Wirtschaftszyklus steht. Tatsächlich wird diese Revolution letztlich das Konzept der »Veralterung« veraltern lassen. Der Komiker Jay Leno beispielsweise, der alte Autos sammelt, verwendet 3D-Drucker, um seine alten dampfbetriebenen Autos zu restaurieren – und das, nachdem die dafür benötigten Teile mehr als ein halbes Jahrhundert lang nicht mehr erhältlich waren. Dank dieser Technologie müssen die Hersteller keine alten Teile mehr auf Lager halten. Sie laden einfach das entsprechende Design herunter und drucken gegebenenfalls ein Ersatzteil aus.

3D-Drucker nutzen nachhaltige Konstruktionsmethoden, aber darüber hinaus können die Hersteller mit ihrer Hilfe vorhandene Materialien und Komponenten wiederverwenden und ihnen personalisierbare und veränderbare Attribute hinzufügen, die für die Kunden besonders interessant sind. Das könnte sich sehr schnell auf den Investitionszyklus wichtiger Waren auswirken. Wenn der endlose Zyklus geplanter Veralterung aufgrund der Verfügbarkeit neuer Modelle wegfällt, reduzieren wir einen maßgeblichen Teil der Fertigung in einigen Branchen und ebenso die ständig steigenden Ausgaben der Verbraucher, die notwendig sind, um mit dem zyklischen Nachkauf von Produkten Schritt zu halten.



Die Zukunft gehört nicht mehr den Branchen – Automobil, Bau, Möbel oder Kleidung –, die endlos Produktlinien für das nächste Jahr oder die nächste Saison auf den Markt werfen, sondern vielmehr Branchen, die in grundlegende Komponenten investieren und für spätere Abänderungen Updates hinzufügen oder Material aufarbeiten. In dieser Zukunft muss dann auch keine komplett neue Maschine hergestellt werden, wenn eine kleinere Komponente ausfällt, wie beispielsweise bei einer Waschmaschine, sondern das Ersatzteil kann vor Ort hergestellt werden, und die ursprüngliche Maschine kann zu einem Bruchteil der Kosten und mit minimalem Umwelteinfluss wieder in einen funktionalen Zustand versetzt werden.

### Größenvorteile

Die additive Fertigung gestattet, Einzelkomponenten zu denselben Stückkosten zu produzieren, als würde man immens viele Komponenten desselben oder eines ähnlichen Designs herstellen. Dies ist anders als bei der traditionellen Massenfertigung, wo erst die Herstellung riesiger Mengen identischer Objekte die Stückkosten für den Kunden senkt. Häufig wählen die Hersteller Produktionsstandorte, wo die Arbeitsgesetze und die Sicherheitsvorschriften weniger streng sind, um die Kosten durch verringerte Ausgaben für Arbeit weiter zu senken – was bei der additiven Fertigung natürlich kein Thema ist.

Die additive Fertigung kann eine grundlegende Wandlung im Hinblick auf die Warenproduktion verursachen, wenn sie erst einmal ausgereift ist. Befürwortern gefällt die Möglichkeit, ad-hoc personalisierte Waren in der Nähe der Verbraucher zu fertigen. Kritiker argumentieren, dass diese Wandlung aktuell existierende Wirtschaftsbereiche zerstören könnte. Diese leben von:

- ✓ Massenproduktion in Billiglohnländern
- ✓ Massentransport von Waren auf der ganzen Welt
- ✓ Lager- und Verteilernetzwerken

Die herkömmliche Fertigung ist von diesen Faktoren abhängig, um ihre Produkte zu den Verbrauchern zu bringen.

Wenn die Produktion in die unmittelbare Nähe der Verbraucher verlagert wird, werden Lieferung und Lagerung von Massenproduktionsgütern überflüssig. Frachtschiffe sowie die Kosten für die Massenproduktionsbranchen werden der Vergangenheit angehören.

Es könnte möglich sein, diese riesigen Frachtschiffe als mobile Zentren für die additive Herstellung zu nutzen, die auf See in der Nähe der Kunden vor Anker gehen, wenn wir uns von den herkömmlichen Massenproduktionsstätten verabschieden. Ein Beispiel für das Potenzial einer solchen Verschiebung ist, dass die Hersteller von Waren für die Winter- oder Sommersaison einfach nach Norden oder Süden fahren könnten, um rund um das Jahr zu produzieren und die Nachfrage der Kunden zu erfüllen, ohne die Probleme und die Kosten, die bei den Transport- und Lagerzyklen der Massenproduktionsgüter auftreten. Und nach einer Naturkatastrophe könnte so ein Schiff einfach kommen und mit dem Recycling der Abfallberge beginnen, um die Schäden zu reparieren.

## *Anwendungen des 3D-Drucks*

Zweifellos werden additive Fertigungstechnologien viele Branchen völlig verändern und womöglich aktuell ausgelagerte Fertigungsarbeiten wieder ins Inland zurückholen. Dies wiederum kann sich auf Branchen auswirken, die den Transport und die Lagerung von Massenwaren anbieten. Die grundlegenden Technologien hinter der additiven Fertigung können sich jedoch auch auf die bei der Produktion verwendeten Materialien auswirken – und darauf, wieviel davon benötigt wird.

Wenn wir die möglichen Auswirkungen der dritten industriellen Revolution betrachten – 3D-Druck, Schwarmfinanzierung, Robotik und Ad-hoc-Medieninhalt sowie zahlreiche andere Technologien –, erkennen wir die Möglichkeit, nicht nur die Produktion als solche zu verändern, sondern auch die herkömmlichen Produktionsverfahren zu erschüttern. In den folgenden Kapiteln beschreiben wir für Sie den aktuellen Status im Bereich 3D-Druck – was die Technologie kann, und was sie nicht kann –, und wie er möglicherweise eines Tages unsere Welt in eine agile, personalisierte, individuelle und nachhaltige Umgebung umwandelt.

Wir beschreiben die verschiedenen Materialarten, die für die additive Fertigung genutzt werden können und bieten einen Ausblick auf die möglichen Materialien, die vielleicht in absehbarer Zukunft unterstützt werden: Wir werden Ihnen zeigen, wie Sie Ihre eigenen 3D-Modelle erstellen oder herunterladen können, und wie Sie sie für Ihre eigenen Zwecke und Projekte einsetzen können. Viele 3D-Objekte können unter Verwendung von kostenloser oder kostengünstiger Software und Fotos der realen Objekte erstellt werden – Objekte von Fotos von historischen Orten, Antiquitäten in einem Museum oder einfach nur Aufnahmen von der Töpferarbeit Ihres Kindes aus dem Kunstunterricht. Bevor Sie Ihr eigenes 3D-Druck-Objekt erstellen, müssen Sie zahlreiche Dinge berücksichtigen, unabhängig davon, ob Sie einen 3D-Druckdienst mit dem Ausdruck beauftragen oder ob Sie sie zuhause selbst ausdrucken. Wir freuen uns darauf, Ihnen darüber berichten zu dürfen.

Wir haben Ihnen jetzt einen kurzen Eindruck verschafft, welches zerstörerische Potenzial die additive Fertigung mit sich bringt, aber sie schafft auch neue Gelegenheiten. Der Übergang von einem Paradigma zu einem anderen ist jedoch schwierig, wenn das Rechtssystem angewendet werden muss, das auf einem früheren Industriezeitalter basiert. Wenn alles von jedem und überall hergestellt werden kann, gibt es zahlreiche rechtliche Probleme im Hinblick auf geistiges Eigentum und gesetzliche Verantwortlichkeit.

## *Die Arbeit mit RepRap*

Der erste 3D-Drucker wurde Ende der 80-er Jahre patentiert, aber in den letzten 30 Jahren hat sich relativ wenig daran geändert. Labore und Forschungsabteilungen verwendeten die ersten 3D-Drucker für schnelle Prototyping-Systeme, die massive Modelle in großer Geschwindigkeit herstellten. Das Ganze nahm Fahrt auf, als der britische Forscher Adrian Bowyer das erste RepRap-System (Self-Replicating Rapid Prototyping, selbstreplizierendes schnelles Prototyping) erschuf. Er verwendete dazu übliche Schrittmotoren und gebräuchliche

Materialien aus dem lokalen Hardware-Laden. Die Angabe »selbst-replizierend« bedeutet, dass ein RepRap-System genutzt werden kann, um viele der Komponenten für ein zweites System zu drucken.

Später in diesem Buch werden wir Ihnen zeigen, wie Sie Ihren eigenen RepRap bauen, ihn konfigurieren und viele Dinge unter Verwendung von kostenloser Open Source-Software damit herstellen können – sogar einen weiteren RepRap-3D-Drucker, wenn Sie das wollen.

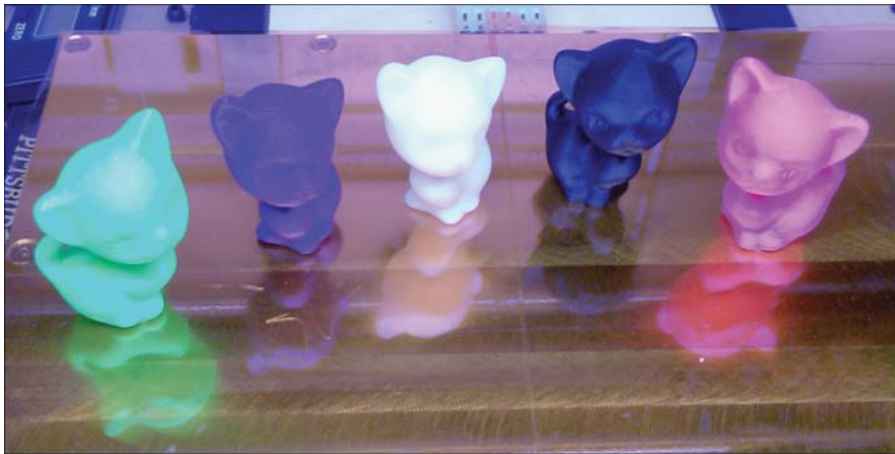
# Verschiedene Arten des 3D-Drucks

# 2

## In diesem Kapitel

- ▶ Die grundlegenden Formen der additiven Fertigung kennenlernen
- ▶ Spezielle Formen der additiven Fertigung erkennen
- ▶ Verstehen, wo die aktuellen Technologien an ihre Grenzen stoßen

**E**gal, ob wir über additive Fertigung, direkte digitale Herstellung, schnelles Prototyping oder 3D-Druck sprechen, es geht letztlich immer um denselben Prozess – die Übersetzung eines auf einem Computer gespeicherten 3D-Designs in eine Folge dünner Schichten, aus denen anschließend in einem 3D-Drucker ein reales, physisches Objekt erstellt wird. Dabei wird immer dasselbe Verfahren angewendet, ob Sie nur kleine Spielzeugkätzchen drucken, wie sie meine Tochter letztes bei ihrer Geburtstagsparty verschenkt hat (siehe Abbildung 2.1), oder eine ganze Flugzeugtragfläche aus Leichtmetallen.



*Abbildung 2.1: Kunststoffkätzchen aus dem 3D-Drucker als Geschenke für die Besucher eines Kindergeburtstags*

Und täglich entstehen mehr Anwendungen für diese Technologie. Nimmt beispielsweise ein Schiff eine additive Fertigungsanlage mit an Bord, können die Seeleute auf See Ersatzteile drucken. Die U.S. Army richtet ihre eigenen *Fablabs* (Fabrication Laboratories, Herstellungslabors) für schnelles Prototyping an der Front ein, um schnelle Abänderungen an vorhandenen Technologien vornehmen zu können. Beispielsweise hat man dabei eine kleine Kunststoffklammer abgeändert, die die Ein/Aus-Taste an Taschenlampen abdeckt. Diese Klammer ist

äußerst wichtig, weil sie verhindert, dass die Soldaten bei verdeckten Operationen versehentlich ihre Taschenlampen einschalten und damit ihre Position preisgeben. In Zukunft könnte diese Technologie auch im Vakuum des Weltalls genutzt werden: Die NASA beschäftigt sich mit Techniken, um aus Designs schichtweise Objekte zu erstellen, statt sich auf die Ersatzteile verlassen zu müssen, die die Astronauten für alle ihre Gerätschaften mit in das All, auf den Mond oder sogar auf andere Planeten wie etwa den Mars nehmen.

Dieses Kapitel beschreibt einige aktuelle Anwendungen für diese Technologie – und einige der vorhandenen Einschränkungen.

## Die grundlegenden Formen der additiven Fertigung

Um das Design eines virtuellen 3D-Modells in mehrere Schichten zu übersetzen, aus denen sich schließlich ein Objekt zusammensetzt, brauchen alle 3D-Drucker die eindeutigen Koordinaten für jeden Teil des herzustellenden Objekts.



Einige 3D-Drucker arbeiten auf einer ebenen Oberfläche, der sogenannten *Konstruktionsplatte*, während andere Drucker das Granulat für die Objekte in aufeinanderfolgenden Schichten auftragen. Die RepRap-Drucker, deren Aufbau wir Ihnen am Ende dieses Buchs zeigen, unterstützen zwei Formen: *Kartesisch* (wobei Motoren eine Bewegung in X-, Y- und Z-Richtung vornehmen, siehe Abbildung 2.2) und *Delta* (wobei mechanische Verbindungen von drei Motoren verwendet werden, um eine Spritzdüse innerhalb des gesamten Konstruktionsraums zu bewegen). Selbst Delta- und Polar-3D-Drucker brauchen jedoch die X-, Y- und Z-Koordinaten, an denen sie das Konstruktionsmaterial für das endgültige Objekt anbringen.

Diese Drucker sind genau auf die Eigenschaften der Materialien ausgelegt, die sie für den Druck verwenden. Die gebräuchlichsten Typen sind:

- ✓ Fotopolymer
- ✓ Granulat
- ✓ Laminierung
- ✓ Schmelzschichtmodellierung (Fused Deposition Modeling, FDM)

In den nächsten Abschnitten werden wir genauer auf diese Formen eingehen.

### Fotopolymer

*Fotopolymere* sind Materialien, die sich von einer Flüssigkeit sofort in ein Festmaterial umwandeln, wenn das richtige Licht darauf trifft. Sie sind hervorragend für die additive Fertigung geeignet.

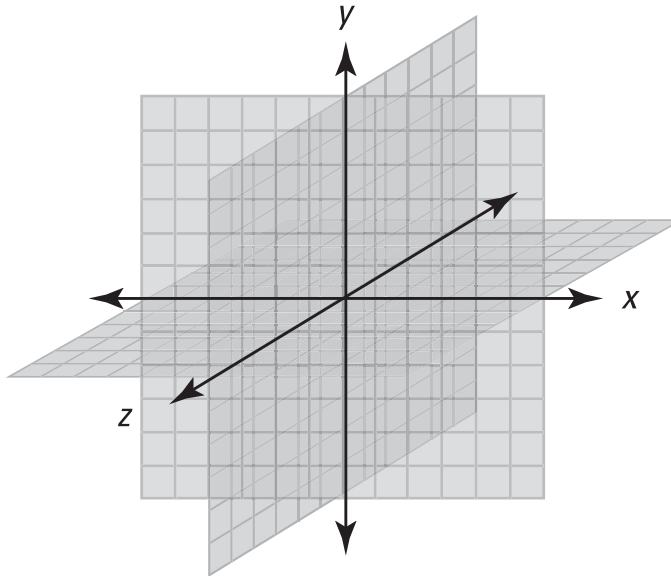


Abbildung 2.2: Kartesische Koordinaten unter Verwendung der Notation mit X-, Y- und Z-Achsen

Die erste Form der additiven Fertigung wurde von ihrem Erfinder Charles Hall als *Stereolithografie* bezeichnet. Hall gründete »3D Systems« und ist dort heute noch Geschäftsführer. Aus dem Wort »Stereolithografie« wurde die Bezeichnung des Standarddateityps für die auf einem 3D-Drucker erzeugten Objekte abgeleitet, STL, den Hall Ende der 80-er Jahre entwickelt hat. Auch heute verwenden 3D-Drucker und die zugehörige Software noch den Dateityp STL für die gebräuchlichsten Druckoperationen. Nachdem jedoch Vollfarb- und Mischmaterialien im 3D-Druck möglich geworden sind, sind auch einige moderne Dateitypen entstanden. Die SLA-Fertigung wird häufig für die hochauflösende Objektherstellung verwendet, mit sehr detaillierten Oberflächen, wie beispielsweise bei Schmuck-Mastervorlagen für Formung und Guss.

Die Stereolithografie verwendet gebündeltes UV-Licht, um flüssigen Fotopolymer-Kunststoff in seine feste Form umzuwandeln (siehe Abbildung 2.3). Der ganze Prozess findet auf einer beweglichen Plattform oberhalb eines Behälters mit flüssigem Fotopolymer-Kunststoff statt. Die Plattform taucht genau so weit in den Behälter ein, dass eine dünne Flüssigkeitsschicht darauf entsteht. Ein Ultraviolett-Laser bewegt sich über die Flüssigkeit, um diese erste Schicht des Objekts zu härten. Anschließend wird die Plattform weiter abgesenkt, sodass wiederum die erste Schicht mit Flüssigkeit bedeckt wird, woraus die zweite Schicht über der ersten Schicht entsteht. Jede Schicht muss mit der darunterliegenden Schicht oder einer Stützstruktur (die später entfernt werden kann) verbunden werden, damit das Objekt nicht verrutscht, wenn die neuen Schichten hinzugefügt werden und weiteres flüssiges Polymer darauf angebracht wird.

Beim Aufbau von Objekten unter Verwendung der Stereolithografie entsteht ein hervorragender Detailgrad (siehe Abbildung 2.4), aber als Materialien können derzeit nur Polymere eingesetzt werden, die unter Verwendung von gebündeltem Licht zu einem festen Zustand

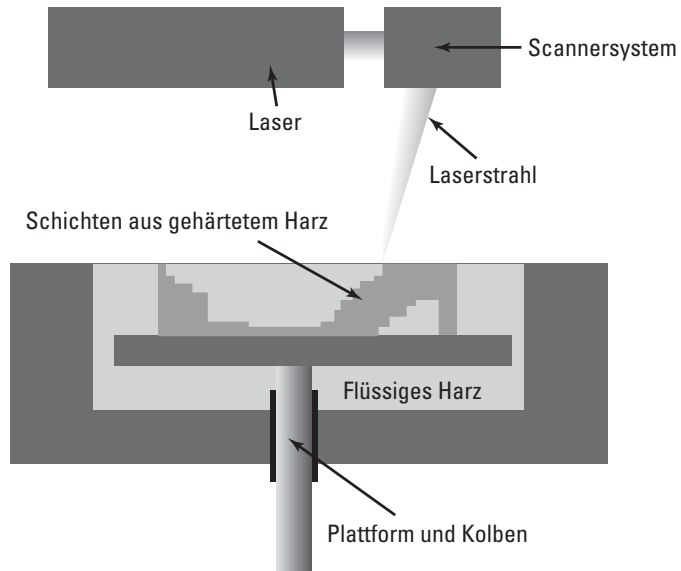


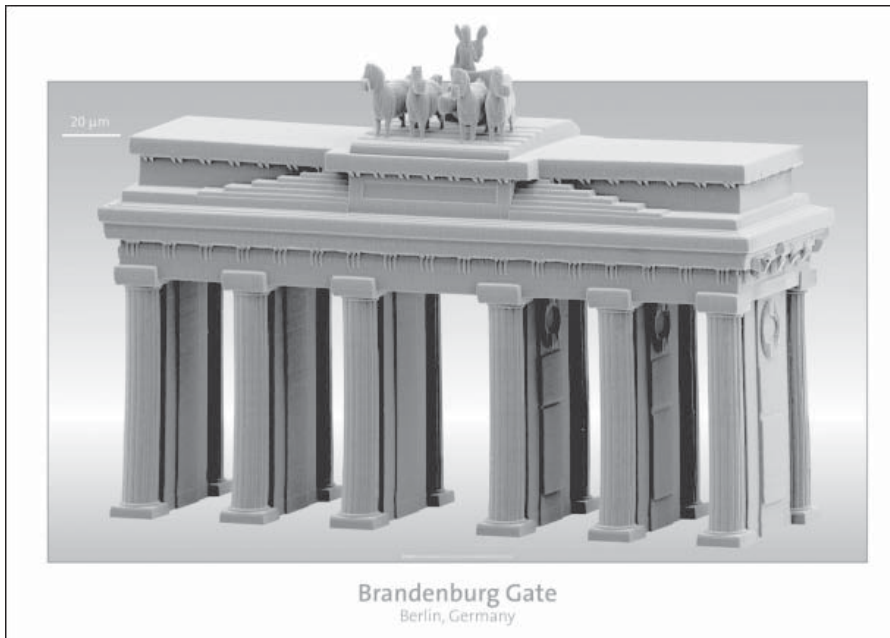
Abbildung 2.3: Funktionsweise der Stereolithografie



Abbildung 2.4: Beispiel für eine mit dem Drucker FormOne gedruckte Stereolithografie

gehärtet werden können. Neue Entwicklungen umfassen die Projektion von DLP-Licht auf eine komplette Schicht über dem Boden des Konstruktionsvolumens, sodass jeweils die ganze Schicht gehärtet wird, wenn das Objekt aus der Polymer-Flüssigkeit angehoben wird. Dazu wird eine Lichtquelle an der Oberseite angebracht, die die komplette Fläche abdeckt.

Hochauflösende Varianten der Stereolithografie verwenden Laser, die so stark fokussiert sind, dass die einzelnen Elemente des fertigen Objekts mikroskopisch klein sein können. Mit diesen Multi-Photonen-Lithografie-Designs wurden schon ganze Gebäude in so kleinem Maßstab hergestellt, dass sie in einem einzigen Wassertropfen untergebracht werden konnten. Beispielsweise ist das in Abbildung 2.5 gezeigte Modell des Brandenburger Tors nur einen Bruchteil eines Millimeters groß.



*Abbildung 2.5: Beispiel für eine Multi-Photonen-Lithografie, erstellt mit dem 3D-Drucker NanoScribe  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von NanoScribe)*

Das PolyJet-System von Objet verwendet ebenfalls eine Fotopolymerisierung, aber hier werden Tintenstrahlmaterialien verwendet, um die Schichten aufzubauen. Dieses System verwendet kein Flüssigkeitsbad, sondern stellt die Materialien in separaten Kartuschen im Drucker bereit. Diese Materialien können beim Aufsprühen sogar gemischt werden, wobei die aufgetragene Sprayschicht nach jedem Durchgang mithilfe von Ultraviolettlicht gehärtet wird (siehe Abbildung 2.6). Mit diesem Ansatz können Sie Ausdrücke erstellen, die eigentlich unmöglich zu sein scheinen – beispielsweise ein Schiff in einer transparenten Flasche oder einen Fötus, der im Bauch der Mutter gestikuliert.



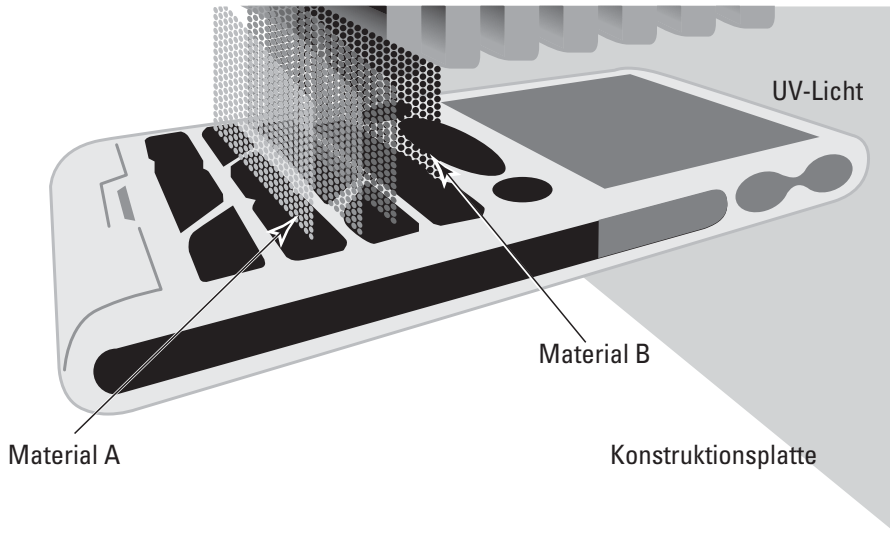


Abbildung 2.6: Der Fotopolymer-Drucker PolyJet von Objet kann mehrere Materialtypen mischen.

Dank der Fähigkeit des PolyJet, Materialien zu mischen, können auch unterschiedliche Funktionalitäten innerhalb desselben Druckobjekts realisiert werden (siehe Abbildung 2.6). Das bedeutet, komplexe Objekte können innerhalb desselben Prozesses gedruckt werden, wie zum Beispiel eine Prothese (ein bewegliches Gelenk zwischen festen Rumpfkomponten aus Hartkunststoff). Mit diesem Ansatz können Sie gegebenenfalls verschiedene Materialkombinationen gleichzeitig anbringen, beispielsweise teilweise gummiert, teilweise als Festkörper. Gute Beispiele für diese Art Prototyping wären etwa ein Mobiltelefon mit einer harten Kunststoffschale und einem gummiarmiertem Griff oder die Räder an einem Spielzeugauto, wobei ein starres Rad und ein Gummireifen innerhalb eines einzigen Druckvorgangs hergestellt werden.



Den Detailgrad und die Personalisierung, die mit diesen Multimaterialdruckern möglich sind, kann man in vielen großen Filmen beobachten. Beispielsweise wurde der Drucker von Objet verwendet, um die Rüstung von Robert Downey Jr. in den *Iron Man*-Filmen perfekt anzupassen. Außerdem unterstützte der Drucker von Objet das Special Effects-Team beim Blockbuster *Prometheus*, um schnell die blasenartigen Raumhelme für zahlreiche Schauspieler herzustellen und genau anzupassen, wie beispielsweise Noomi Rapace und Michael Fassbender.

### Granulat

Eine weitere gebräuchliche Technik für Kunststoffe, Metalle und sogar Keramik basiert auf der Verwendung eines Granulatpulvers. Diese Technologie wurde bereits angewendet, um große Objekte herzustellen, wie beispielsweise das Auto von James Bond in *Skyfall*, oder auch

flexible Kunst, wie etwa das Kleid aus dem 3D-Drucker, das Model Dita von Teese trug. Das Granulat kann auf unterschiedliche Weise gehärtet werden, unter anderem:

- ✓ indem das Granulat mit Klebematerial verbunden wird zum Beispiel mit Klebstoffen
- ✓ indem das Granulat *gesintert* wird (Verbindung der Pulver, indem sie bis über ihren Schmelzpunkt erhitzt werden), wie in Abbildung 2.7 gezeigt
- ✓ durch Schmelzen (Verbindung der Pulver, indem sie bis über ihren Schmelzpunkt erhitzt werden, um einen vollständigen Schmelzpool aus dem Material zu erzeugen) mit einem Laser oder einem Elektronenstrahl, die die erforderliche Energie bereitstellen, das Pulver nur dort zu verbinden, wo dies für das endgültige Objekt erforderlich ist

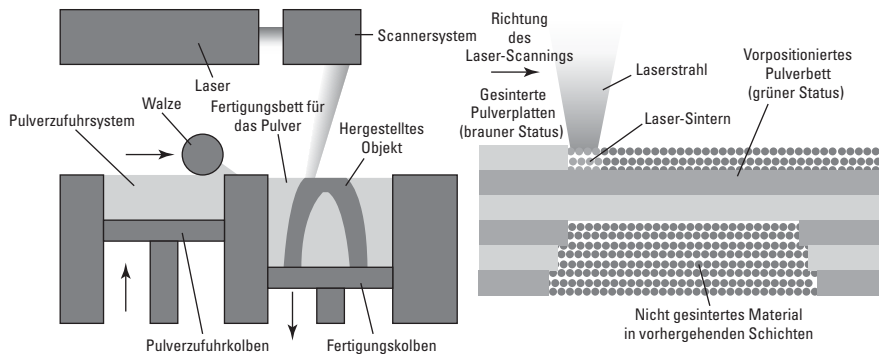


Abbildung 2.7: Sintern des Pulvers mit einem Laser

### Pulverbindung

Pulverbindende Drucker verwenden Tintenstrahlsprays, um einen schnell härtenden Binder in das Pulverbett einzubringen, sodass das neue Festkörperobjekt aus diesem aufgesprühten Kleber und dem Basispulver entsteht. Nachdem das komplette Modell fertiggestellt ist, wird das nicht gebrauchte Pulver entfernt und zur Wiederverwendung aufbereitet (siehe Abbildung 2.8). Wenn das fertige Objekt größer als das Konstruktionsvolumen des Druckers ist, kann eine Endmontage vorgenommen werden. Wenn viele der ineinandergreifenden Bestandteile bereits

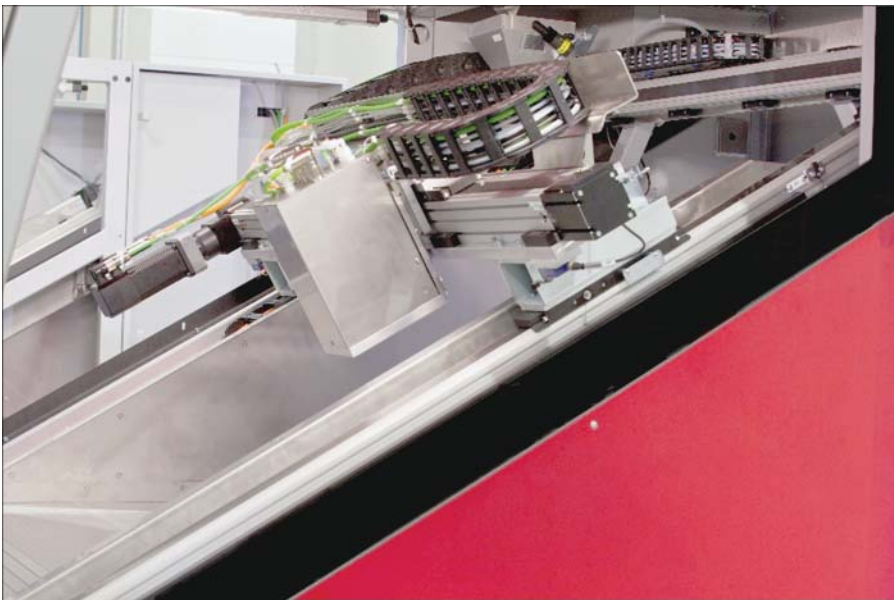


Abbildung 2.8: Ein bereits verbundenes Stück eines 3D-Druck-Kleidungsstücks wird aus einem Granular-Bindepulver-Bett genommen.  
(Bild mit freundlicher Genehmigung des Francis Bitoni Studios)

beim 3D-Druck fertig montiert hergestellt werden – statt sie einzeln herzustellen und dann zu montieren –, ist im Vergleich zu herkömmlichen Fertigungsprozessen sehr viel weniger Aufwand nötig.

Objekte aus Kunststoffpulver bleiben granular und können einfach zerfallen, wenn sie nicht in Harz getaucht werden, um die Lücken zwischen den Granulaten zu füllen. Für Metall- und Glasguss werden die resultierenden »festen« Formen stabilisiert, indem sie aufgeheizt werden, um den Binder und das Pulver zu verschmelzen. Bei der Verwendung von einfachem Metallpulver wird die Mischung zur Pulverbindung durch zusätzliche flüssige Metalle eingespritzt (zum Beispiel Bronze), um eine stärkere Legierung oder ein ansprechenderes Aussehen zu schaffen. Man findet diese Vorgehensweise häufig bei der Herstellung von Schmuck, wo kostbare Materialien wie Gold oder Silber zu teuer sind, um das Pulverbett zu füllen, wenn sie in granularer Form hergestellt werden. Die Verwendung von Pulvergranulat aus einem allgemeineren Material senkt außerdem die Materialkosten, die bei der Herstellung von wirklich personalisierten und einzigartigen Objekten entstehen.

Das Pulverbett stützt das gehärtete gebundene Material, deshalb ist es mit dieser Fertigungstechnik möglich, große, komplexe Designs zu erstellen, ohne befürchten zu müssen, dass filigranere Elemente bei der Herstellung wegbrechen. Ein Anbieter, VoxelJet, nutzt die Unterstützung des Pulverbetts, um einen Endlosdruck für Objekte zu realisieren. Sein System verwendet eine Bindedüse, die über einem geneigten Granulatbett arbeitet, sowie ein Förderband, das das gesamte Pulvervolumen langsam durch den Drucker bewegt. Auf diese Weise schafft der Drucker Modelle, indem er einfach an der Neigung Schicht für Schicht weiteres Pulver aufträgt (siehe Abbildung 2.9) und das Pulver abhängig von dem 3D-Design selektiv bindet. Diese Funktion



*Abbildung 2.9: Ein 3D-Drucker von VoxelJet, der das Pulverbett entlang einer geneigten Ebene bindet  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von VoxelJet)*

kann sogar genutzt werden, um Festkörperobjekte zu erstellen, die länger als die gesamte Druckertiefe sind, indem weiter am vorderen Ende des Modells gedruckt wird, wenn das hintere Ende bereits über das Förderband hinter den Drucker hinausgeschoben wurde.

### *Blown Powder – Geblasenes Pulver*

Eine weitere Technik, die bei der Metallfertigung verwendet wird, ist das Blasen von Metallpulver in einen Laser- oder Elektronenstrahl, sodass das geblasene Pulver dem durch die Wärmequelle gebildeten Schmelzpool hinzugefügt wird. Das ist vor allem dann praktisch, wenn für die Materialien eine sehr hohe Schmelztemperatur erforderlich ist – Beispiele dafür sind etwa Tantal oder Titan bei der Flugzeugherstellung oder die Kantenbeschichtung von Turbinenschaufeln (bei der Reparatur oder beim erweiterten Betrieb). Wie bei den anderen Formen der additiven Fertigung ist mit der Blown Powder-Technik ein sehr präziser Auftrag möglich, um komplexe Fertigobjekte zu schaffen, für die nicht mehr Aufwand als bei einem einfachen Design erforderlich ist, für das dieselbe Menge an Material verwendet wird (siehe Abbildung 2.10).



*Abbildung 2.10: Ein Kühlerblock aus Titan, erstellt mit dem DMLS-3D-Drucker (Direct Metal Laser-Sintering) von EOS für WithinLab  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von WithinLab)*

### *Laminierung*

Eine weitere Form der additiven Fertigung, die *Laminierung*, verfolgt einen ganz anderen Ansatz. Statt Pulverschichten oder Materialschmelzpools anzubringen, schneidet die

Laminierung einzelne Materialschichten aus und fügt sie dann aufeinander zusammen, wofür eine Art Kleber eingesetzt wird. Für die Herstellung von laminierten Objekten können Metallfolien, Kunststofffolien und sogar ganz normales Papier verwendet werden, wie in Abbildung 2.11 gezeigt.

### Freiform-»Schweißen« durch Einbringung von Draht in den Elektronenstrahl

Im Weltraum verbietet das Fehlen der Schwerkraft die Verwendung eines Pulverbettdrucks, und die Blowing Powder-Technik würde zur Entstehung eines kleinen, unerwünschten zweiten Raketenauspuffs führen. Um dieses Problem zu umgehen, hat die NASA eine ganz ähnliche Technik wie den Blown Powder 3D-Druck erforscht: Ein System, das präzise gesteuert Draht in den Elektronenstrahl einbringt. Durch Verwendung eines Metalledrahts (wie bei Elektronenstrahl-Schweißsystemen auf der Erde) konnten Forscher dieselbe additive Fertigung ohne Schwerkraft oder Atmosphäre durchführen – und ohne die Gefahr, dass Metallpulver in die Luftversorgung der Kabine gelangt.

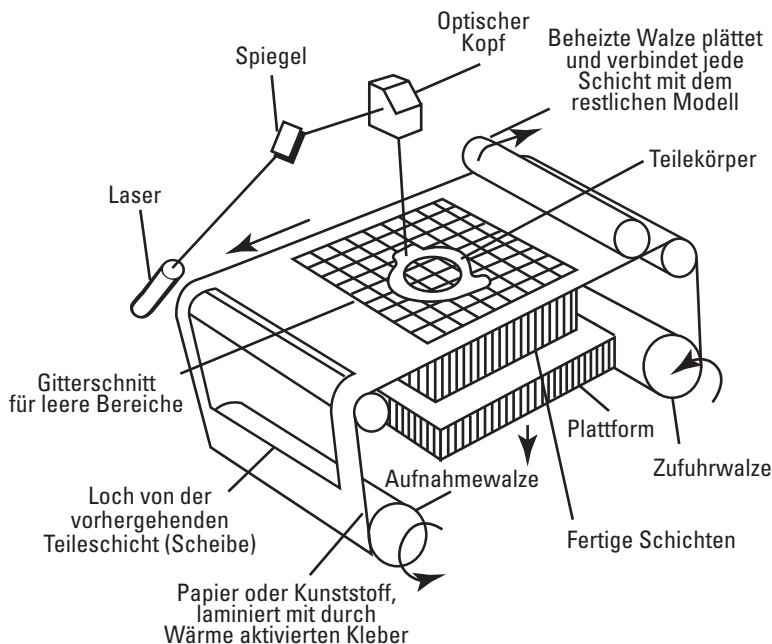


Abbildung 2.11: Herstellung laminierten Objekte (LOM). Hier werden mit dem Laser Schichten aus Kunststofffolie oder Papier ausgeschnitten und mit einem durch Wärme aktivierten Kleber verbunden.

Das fertige Produkt ist nur so stark wie das Material, aus dem es hergestellt ist – Papier, Folie oder Kunststoff mit dem Kleber –, und bei Systemen zur Herstellung laminierten Objekte

fehlt die Z-Achse (wenn das Objekt größer wird), weil jede Schicht nicht höher als die Dicke der Materialfolie plus der Kleberschicht sein kann. Dennoch können solche Systeme sehr attraktiv für Kunden sein, die Modelle für ein schnelles Produkt-Prototyping benötigen und eine kostengünstige und schnelle Anfertigung einer hochauflösenderen Alternative vorziehen.

### *Schmelzschichtmodellierung (Fused Deposition Modeling, FDM)*

Die vielleicht bekannteste Form der additiven Fertigung ist die *Schmelzschichtmodellierung* (*Fused Deposition Modeling*, FDM), die Ende der 80-er Jahre von Stratasys erfunden wurde. Unter Verwendung derselben STL-Dateien, die von 3D Systems für das Stereolithografie-System verwendet werden, presst der 3D-Drucker bei der Schmelzschichtmodellierung geschmolzenes Thermoplast durch eine kleine Düse, um ein Objekt zu schaffen. Man kann sich diesen Prozess etwa so vorstellen, wie Sie Zahncreme aus der Tube auf Ihre Zahnbürste drücken. Durch die Anbringung von Schichten geschmolzenen Kunststoffes kann das Objekt erstellt und innerhalb weniger Minuten schnell auf Zimmertemperatur abgekühlt werden (siehe Abbildung 2.12).

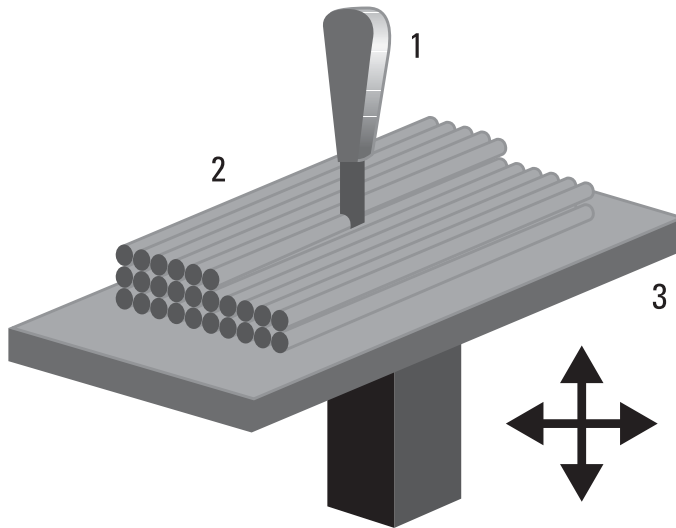


Abbildung 2.12: Grafische Darstellung der Schmelzschichtmodellierung (*Fused Deposition Modeling*, FDM)

Weil der Begriff *Fused Deposition Modeling* (FDM) geschützt ist, wird dieser Prozess von Amateuren und Forschern auch als *Fused Filament Fabrication* (FFF, Schmelzfadenfertigung) bezeichnet.



Der RepRap-3D-Drucker verwendet geschmolzenes Thermoplast, um Objekte herzustellen, beispielsweise auch viele der Teile, die für den Bau eines weiteren RepRap-Druckers benötigt werden. In den letzten Kapiteln dieses Buchs zeigen wir Ihnen, wie Sie Ihren eigenen RepRap-Drucker bauen.





Das in solchen 3D-Druckern verwendete Thermoplast wird normalerweise in Spulen mit dünnem Faden verkauft, mit Stärken zwischen 1,75 und 3,00 mm. Dieser Faden kann aus ABS-Polymer (Acrylnitril-Butadien-Styrol), Polylactide-Biokunststoff (PLA), wasserlöslichem Polyvinyl-Alkohol (PVA) zur Verstärkung, Nylon und Verbundmaterialien bestehen. Ein solcher experimenteller Holz-Kunststoff-Verbundfaden kann sandgestrahlt und wie Holz bemalt werden und sogar ein holzfaserartiges Muster erhalten, indem die Temperatur variiert wird, mit der er herausgedrückt wird.

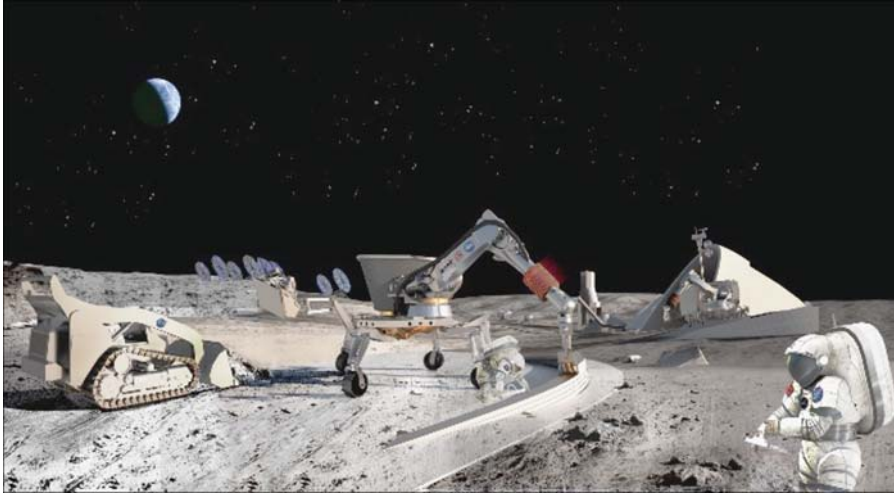
Viele 3D-Drucker – wie beispielsweise der Cube, den es demnächst beim Bürobedarfsanbieter Staples geben wird – benötigen ganz spezielle Kartuschen, die bereits mit hochqualitativem Faden geladen sind. Dieser proprietäre Ansatz stellt sicher, dass der Faden die richtige Stärke hat, und dass er genau bei der vorgegebenen Temperatur schmilzt, womit das Drucken ganz einfach wird. Die Kartuschen können jedoch sehr teuer sein. Viele Open Source-Vertreter in der RepRap-Gemeinschaft bevorzugen einen kostengünstigeren generischen Faden, womit die Verwendung von Materialien möglich ist, die noch nicht in Kartuschen angeboten werden – beispielsweise Kunststoff, der im Dunkeln leuchtet. Einige komplexere Varianten der RepRaps und ihre gewerblichen Ausprägungen (zum Beispiel der MakerBot Replicator) können gleichzeitig mit mehreren Fäden drucken. Die Flexibilität generischer Fäden kann sehr praktisch sein – insbesondere, wenn Sie sich die Zeit nehmen, die Qualität generischer Fäden unterschiedlicher Anbieter zu vergleichen. Wir werden später in diesem Buch noch einmal auf diese Probleme eingehen, wenn es um den Bau eines eigenen 3D-Druckers geht.

## **Spezielle Formen der additiven Fertigung**

Neben dem Thermoplast können die Drucker auch andere Materialien im geschmolzenen, gelförmigen oder halbflüssigen Zustand ausstoßen, um die unterschiedlichsten und erstaunlichsten Objekte zu schaffen, von detaillierten Wachsmodellen für Schmuck für einen Wachsaußschmelzguss, bis hin zu Nahrungsmitteln und Süßigkeiten. (Beim Wachsaußschmelzguss werden auflösbare Vorlagen in Tonerde eingebettet und dann ausgeschmolzen. Anschließend wird heißes Metall in das Tonerde-Negativ gegossen, das nach dem Abkühlen und Härten des Modells zerstört wird.) Und es wurde sogar schon untersucht, ob Körperteile und komplexe Organe für einen Bio-Druck lebendiger Gewebe geeignet sind.

## **Fertigung mit unterschiedlichen Materialien**

Der Druck von Ersatzteilen für unseren eigenen Körper ist schon erstaunlich genug. Ebenfalls sehr interessant sind Forschungsarbeiten der NASA, um Methoden zu finden, die additive Fertigung auch außerhalb unseres Planeten einzusetzen, um Basisstationen auf dem Mond oder auf dem Mars zu schaffen. Dazu soll nicht sehr viel mehr gebraucht werden als ein paar der dort bereits vorhandenen Steine, die mithilfe von Mikrowellen aus der aufgefangenen Sonnenenergie zusammengefügt werden (siehe Abbildung 2.13). Wenn ein Material gestapelt, geschmolzen, gesintert, herausgedrückt, in Pulverform gebunden oder von einem Roboter



*Abbildung 2.13: Mit der additiven Fertigung können wir uns auf dem Mond niederlassen – und noch sehr viel weiter weg.*

*(Bild mit freundlicher Genehmigung von Contour Crafting)*

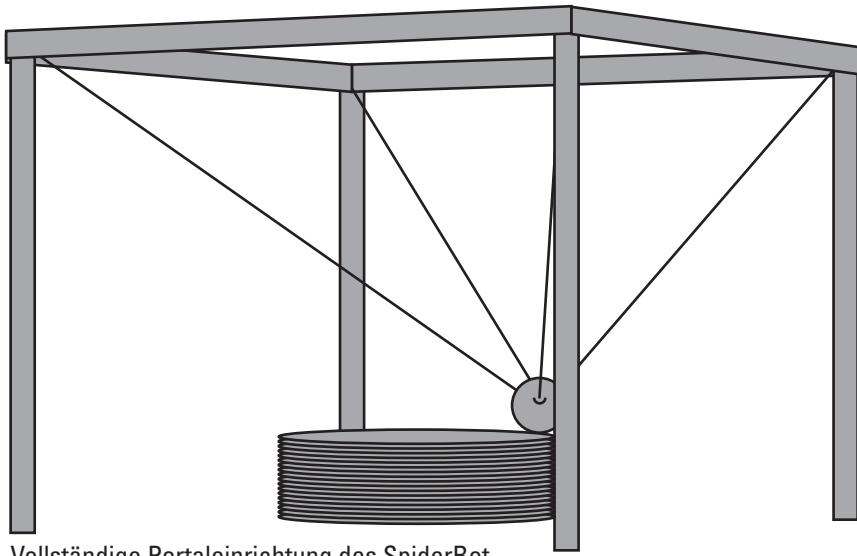
aufgetragen werden kann, kann es für eine Form der additiven Fertigung genutzt werden, um völlig neue Produkte daraus herzustellen. Selbst Abfall, wie beispielsweise das in Milchtüten und Kunststoffflaschen verwendete Thermoplast, kann verwendet werden, um erstaunliche Objekte zu erstellen.

Selbst hier auf der Erde werden Rohmaterialien als neue Quellen für die additive Fertigung untersucht, vom Naturglas (das entsteht, indem Solarenergie gebündelt wird, um Sand zu schmelzen) bis hin zur natürlichen Produktion von Seide. Die Forscher der Mediated Matter Group am MIT beschäftigen sich damit, wie die Natur ihre eigenen Kunstwerke aufbaut, indem sie beobachten, wie Seidenraupen ihre Kokons bauen, und wie Spinnen Spinnennetze bauen. Anschließend übertragen sie das, was sie daraus gelernt haben, auf völlig neue Formen der additiven Fertigung. Ein Beispiel dafür ist der außergewöhnliche 3D-Hängedruker SpiderBot, wie in Abbildung 2.14 gezeigt.

## **Farbdruck**

Ein Bild sagt mehr als 1000 Worte. Das gilt umso mehr, wenn das Ganze in Farbe dargestellt wird. Farbe schafft eine maßgebliche und großartige Variation in Gemälden, Fotos und jetzt auch bei Objekten aus dem 3D-Drucker. Viele Formen der additiven Fertigung erzeugen Objekte in langweiligen Farben, also weiß oder in der Farbe, die das gerade verwendete Material hat, beispielsweise Metall oder Beton. Andere können Materialien unterschiedlicher Farben verarbeiten, beispielsweise den Faden in Thermoplast-Schmelzfertigungssystemen. Das Schmelzen von einem oder zwei Fadentypen gleichzeitig kann Objekte produzieren, wobei verschiedene Farben ineinander übergehen. Durch die Kombination unterschiedlicher Fadentypen können die erstaunlichsten Objekte geschaffen werden.





Vollständige Portaleinrichtung des SpiderBot

*Abbildung 2.14: Der biometrische 3D-Drucker SpiderBot des MIT baut große Strukturen, indem er an Seilen abgesenkt und angehoben wird.*

Außerdem ist es möglich, dass Fadenabschnitte bestimmter Länge miteinander verbunden werden, um Schichten in abwechselnden Farben zu erzeugen. Andere Materialien, wie beispielsweise Nylon, können mit unterschiedlichen Farben eingefärbt werden, sodass jedes Objekt ganz individuell aussieht und noch mehr Personalisierung für die gedruckten Objekte möglich wird. Für professionellere Varianten können bei der Herstellung Seriennummern auf das Objekt aufgedruckt werden.

Additive Fertigungstechniken, die Tintenstrahler verwenden, um gesprühte Pulverbinder aufzutragen – oder Papierschichten für die Laminierung –, können diesen Prozess noch einen Schritt weiterbringen: Sie können den Tintenstrahldruck so nutzen, wie wir ihn kennen – in Farbe. Der Binder muss kein durchsichtiger Kleber zwischen weißem Granulatpulver sein, wenn durch die Farbe zusätzliche Details verdeutlicht werden oder attraktive Prototypen erstellt werden können, die vom Kunden geprüft und kommentiert werden können, bevor das endgültige Produkt auf den Markt kommt.

Dasselbe gilt für Herstellungstechniken mit mehreren Materialien, die einen Prototyp mit mehreren verschiedenen Oberflächenbehandlungen hervorbringen, sodass der potenzielle Anwender ein Modell berühren und befühlen kann, wodurch das endgültige Design sehr viel besser vermittelt werden kann als über eine zweidimensionale Darstellung. Diese Prototypen können nach einem Feedback und Tests schnell angepasst werden, und ein neues Objekt kann innerhalb weniger Stunden gedruckt werden, um sicherzustellen, dass die gewünschten Änderungen das vorgesehene Ziel erfüllen.

Die Produktion unter Verwendung einer direkten digitalen Fertigung kann das Design direkt vom Teststandort übernehmen und unmittelbar die ersten Produktionsmodelle erzeugen

oder Formen für die Massenproduktion daraus anfertigen. Dabei können neue Änderungen berücksichtigt werden, die während der Überprüfung und dem Testen als notwendig festgestellt wurden. Diese Flexibilität ist bei der herkömmlichen Fertigung unmöglich. Für den herkömmlichen Produzenten sind bei Änderungen mitten im Prozess neue Werkzeuge erforderlich. Der Hersteller, der eine direkte digitale Fertigung einsetzt, kann einfach das verwendete Modell anpassen und alle weiteren Objekte mit dem gewünschten neuen Merkmal herstellen. Eine zweite Produktionsstraße könnte abgeänderte Ersatzteile für die bereits hergestellten Produkte herstellen. Stellen Sie sich vor, wie viel Zeit Sie sparen, wenn Sie bei einem Rückruf Ihres Autos wegen eines kleinen Teils nur in die Werkstatt fahren müssen, wo das Ersatzteil für Ihren speziellen Autotyp einfach ausgedruckt wird. Es müssen keine Varianten auf Lager gehalten werden, und Ihr Auto muss auch nicht tagelang in der Werkstatt bleiben, bis das richtige Ersatzteil vom Hersteller geliefert wurde.

## *Grenzen der aktuellen Technologien*

Das Potenzial der additiven Fertigung grenzt wirklich an Wunder. Es gibt jedoch einige Faktoren, die den schnellen Umstieg von der herkömmlichen Fertigung auf die additive Fertigung beeinträchtigen.

### *Produktionsgeschwindigkeiten*

Die kulturellen Erwartungen der unmittelbaren Fertigung wurden von Hollywood geprägt. Wenn ein Schauspieler in *Star Trek* lapidar »Tee – Earl Gray – heiß« sagte, erhielt er sofort eine Tasse heißen Tee. Diese Erwartungen sind immer noch zu hoch. Mit der heutigen Technologie dauert es Minuten, manchmal Stunden, um eine Tasse aus Kunststoff herzustellen, ganz zu schweigen von dem Wasser und dem Tee, mit dem sie gefüllt werden soll (siehe Abbildung 2.15). Das Objekt kann jedoch abhängig von der für die Herstellung verwendeten Technik heiß sein, vielleicht ist es also nur noch eine Frage der Zeit, bis wir wie auf der *Enterprise* eine Tasse heißen Tee bestellen können. Aber es kann dauern.

Neulinge im Bereich 3D-Druck sind manchmal erstaunt, wie lange es dauert, selbst ein kleines Kunststoffobjekt zu drucken. Einige der in Zeitschriften oder in TV-Sendungen über den 3D-Druck gezeigten Objekte sind hochinteressant, aber sie bestehen möglicherweise auch aus Hunderten von Einzelteilen. Das Design und der Druck kosten Zeit – selbst wenn alles beim ersten Mal perfekt klappt. Der Vorteil bei der additiven Fertigung ist, dass komplexe Merkmale, die mithilfe von herkömmlichen Methoden sehr aufwändig zu realisieren sind (Löcher durch das Objekt, aufgestempelte Seriennummern und so weiter), einfach gedruckt werden können, und dass das nicht länger dauert, als dasselbe Modell ohne diese Details zu drucken.

### *Größenbeschränkungen*

Die meisten 3D-Drucker haben ein vorgegebenes Volumen, innerhalb dessen sie ihre Ausgaben erzeugen können. Für einige Drucker ist selbst unsere Teetasse aus *Star Trek* schon zu groß,



Abbildung 2.15: Der Ausdruck dieser kleinen Eule aus Kunststoff dauert ca. 15 Minuten.

andere (wie der VoxelJet) können eine komplette Straßenlaterne in einem Durchgang drucken. Realistisch muss man sagen, die meisten Systeme für die additive Fertigung haben derzeit ein *begrenztes Konstruktionsvolumen* (das größte Ding, das sie herstellen können, muss in den Drucker passen), aber dieses Konzept wird vielleicht schon bald abgeändert, wenn offene Systeme wie der SpiderBot perfektioniert werden können.

Der Einsatz von Robotern für die additive Fertigung scheint redundant zu sein – schließlich sind Systeme für die additive Fertigung eine spezielle Art Roboter. Wie die herkömmlichen Fließbänder profitiert jedoch auch die additive Fertigung von Industrierobotern, um die fertigen Objekte herauszunehmen und fertigzustellen, ebenso wie von der Verbesserung der Analysesoftware und der Designsysteme für den Entwurf unserer zukünftigen Wohnungen und der Möbel darin. Sie helfen den Kunden (in Form von Expertensystemen), genau das auszuwählen, was sie kaufen wollen, bevor sie kaufen.

### Einschränkungen des Objektdesigns

Ihre Tasse Tee muss nicht nur in den Drucker passen, sie muss zuallererst druckbar sein. Hier können Erfahrungen im Hinblick auf Design und Materialwissenschaft helfen. Nicht jedes hohle Objekt mit Griff kann als Tasse bezeichnet werden. Abhängig davon, woraus das Objekt besteht, verwendet man es vielleicht besser als Gießkanne.

Alle Formen der Herstellung haben ihre Probleme. Jeder, der sich mit Spritzguss auskennt, weiß, dass es Luftkanäle geben muss, damit die Luft aus der Form austreten kann, wenn das Material eingefüllt wird. Bei der additiven Fertigung ist es nicht anders. Einige Probleme sind bereits allgemein bekannt.

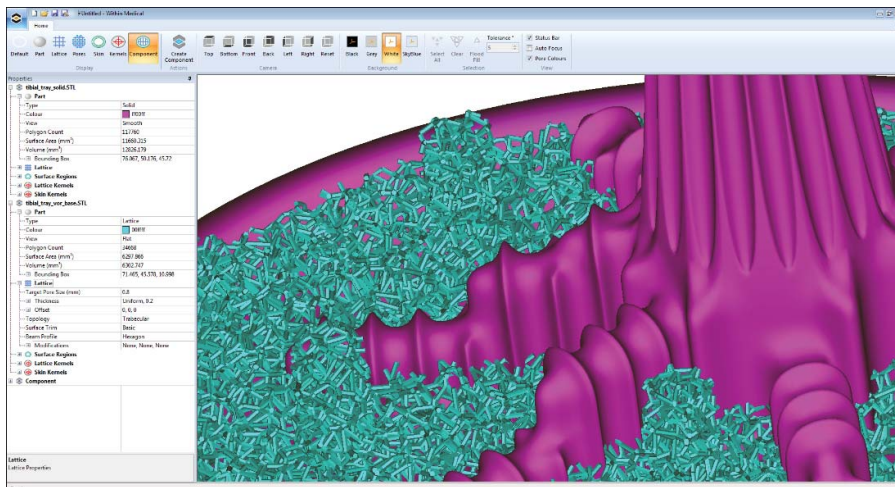
Bei einigen 3D-Druckformen ist eine wirksame Stützstruktur erforderlich, die später entfernt werden kann, falls es einen bestimmten Überhang gibt, sodass die einzelnen Schichten

übereinander angeordnet werden, ohne dass Lücken oder abfallende Kanten entstehen. Für die Bedienung der Software für das Design druckbarer Objekte ist außerdem eine gewisse Erfahrung notwendig. Die eigentliche Software muss dabei nicht teuer sein. Viele Varianten für den Privatgebrauch kosten nicht die 1000 Euro, wie sie für Profipakete ausgegeben werden müssen – und es ist davon auszugehen, dass sich die gesamte Software-Palette sehr schnell weiter verbessern wird. Es gibt bereits neue Software, mit der farbige Objekte entworfen werden können, komplexe interne Hohlräume und Strukturen, ineinandergreifende Komponenten innerhalb derselben Konstruktion sowie die spezifischen Eigenschaften eines Objekts basierend auf seinem einzigartigen Materialmix an jeder Stelle der Konstruktion. Um die Software-Anforderungen und einige der Optionen für den 3D-Druck wird es später in diesem Buch gehen.

## *Materialeinschränkungen*

Die Vielzahl neuer Materialien für 3D-Drucker wächst täglich an, zu schnell, um sie hier beschreiben zu können. Im Jahr vor der Veröffentlichung dieses Buchs hat allein das PolyJet-System von Objet 100 verschiedene Materialtypen unterstützt. Andere Hersteller setzen alles daran, immer mehr Optionen für Material und Fertigungstechniken anbieten zu können.

Während die Biodrucker vor einem Jahr noch unter höchstem Aufwand einen funktionalen künstlichen Knorpel herstellten, werden heute schon die ersten im 3D-Drucker erstellten Organe getestet. Im nächsten Jahr können Sie wahrscheinlich ganz einfach ein Steak für Ihren Grillabend ausdrucken, und ich werde mir einen Ersatz für mein kaputtes Knie drucken (siehe Abbildung 2.16). In ein paar Jahren werden auf dem 3D-Drucker erstellte Ersatzherzen



*Abbildung 2.16: Ein komplexer bio-kompatibler Ersatzknochensockel, der mit der Software Within Medical entworfen wurde (Bild mit freundlicher Genehmigung von WithinLab)*

oder neue Muskelerweiterungen direkt in unseren Körper gedruckt, und das ganze wird völlig normal sein, so wie das Silberbesteck aus dem 3D-Drucker (siehe Abbildung 2.17).



*Abbildung 2.17: Silbergabeln aus dem 3D-Drucker  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von Francis Bitoni Studio)*

Die heutigen Fertigungstechniken sind schon sehr ausgefeilt, aber sie sind nicht perfekt. Im Vergleich zu Spritzgussobjekten haben die aus geschmolzenem Thermoplast in den 3D-Druckern erzeugten Objekte leichte Schwächen an den Kanten jeder Schicht. Sowohl gebundene als auch gesinterte Granulatmaterialien haben eine komplexere – und potenziell fragilere – innere Struktur als ihre festgeschmiedeten Alternativen, aber sie wiegen auch sehr viel weniger und haben möglicherweise überraschende neue Eigenschaften, von denen man bei ihren Vorgängern nie geträumt hätte. Die Verwendung neuer nachhaltiger Materialien wie Polyactid (ein biologisch abbaubarer Kunststoff, der aus Zuckerpflanzen hergestellt wird) kann außerdem das Recycling vereinfachen und die Akzeptanz von additiv gefertigten Produkten unterstützen. Alle revolutionären Änderungen bringen neue Anforderungen und neue Möglichkeiten mit sich.

# Anwendungen für den 3D-Druck

# 3

## *In diesem Kapitel*

- ▶ Objekte direkt per 3D-Druck erstellen
- ▶ Formen und Gießen mit 3D-Druck genauer betrachten
- ▶ Künstlerische Aspekte und Personalisierung einführen
- ▶ Technologie an strategischen Standorten einsetzen

---

**D**ie additive Fertigung verspricht, dass eines Tages jedes Produkt vollständig personalisiert vor Ort und auf Anfrage ausgedruckt werden kann. Die Anhänger der additiven Fertigung gehen davon aus, dass dieser Tag unmittelbar vor der Tür steht. Die Förderer des 3D-Drucks sehen in diesem Versprechen folgende Möglichkeiten:

- ✓ dass der 3D-Druck die Fertigung – Arbeitsplätze in der Fertigung – wieder zurück in ihr Land holt
- ✓ dass weniger Material verschwendet wird
- ✓ dass keine »Ersatzteile« mehr nötig sind
- ✓ das Potenzial, biologisch abbaubare, nachhaltige alternative Materialien anstelle von auf Erdöl basierenden Kunststoffen zu verwenden, die heute unsere Müllhalden füllen

Trotz der Vorteile dieses neuen Paradigmas gibt es Kritik an der additiven Fertigung. Es gibt bereits Kampagnen, die Objekte aus dem 3D-Drucker in Verruf bringen oder Zweifel daran schüren. Sie stellen Fragen wie etwa »Wenn ein Auto aufgrund eines Teils aus einem 3D-Drucker einen Unfall verursacht, wer ist dann rechtlich dafür haftbar?« Neben dem Versuch, den Verbrauchern zu suggerieren, dass ein Auto nur aufgrund eines gedruckten Teils einen Unfall verursachen kann, wollen dieselben Kritiker verhindern, dass die Öffentlichkeit darauf aufmerksam wird, dass bereits viele Teile und Komponenten unter Verwendung additiver Fertigungstechniken entworfen, getestet und als Prototypen erstellt wurden, und dass sie in einigen Fällen sogar auf diese Weise produziert werden. In einigen Bereichen geht man schon mehrere Jahrzehnte so vor.

Egal, wie Sie es sehen, die additive Fertigung wird sich auf die Herstellung von Waren auswirken. Und sie hat die Massenproduktion bereits beeinflusst – sowohl die Produktionsstätten als auch die Verfahrensweisen. Eines Tages wird diese Technologie womöglich die einzige Methode darstellen, Waren zu produzieren, und jedes Produkt wird vor Ort hergestellt und vollständig personalisiert. So weit sind wir aber noch nicht. Selbst wenn man die

Entstehung einer modernen »Maschinensturmbeziehung« verhindert, sind die herkömmlichen Fertigungsverfahren fest in der Wirtschaft verankert und werden noch lange Zeit ohne größere Veränderung existieren. Aber selbst in diesen traditionellen Konstellationen hat sich die additive Fertigung bereits bemerkbar gemacht und trägt unentwegt dazu bei, ganz alltägliche Produkte herzustellen.

In diesem Kapitel geht es um die Anwendung additiver Fertigungstechnologien, wie es sie heute gibt.

## **Objekte direkt per 3D-Druck erstellen**

Wie in Kapitel 2 bereits angesprochen, gibt es bereits heute zahlreiche verschiedene Formen der additiven Fertigung, um Objekte unter Verwendung von Kunststoff, Harz, Metall und unterschiedlichsten anderen Materialien direkt herzustellen. Damit ergeben sich ganz von selbst einige naheliegende aktuelle Anwendungen, unter anderem Prototyping, direkte digitale Fertigung und vieles andere mehr.

### **Schnelles Prototyping**

Die früheste Nutzung des 3D-Drucks war die Herstellung von digital entworfenen Objekten als Prototypen neuer Designs, bevor diese in Produktion gingen (siehe Abbildung 3.1). Die Vorteile beim schnellen Prototyping mithilfe der additiven Fertigung werden in Prozessen wie den folgenden offensichtlich:

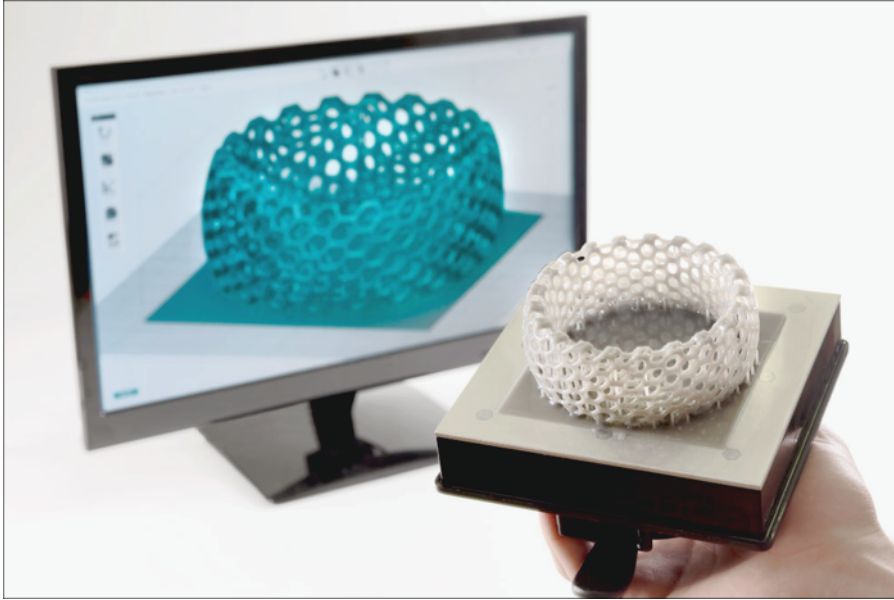
1. Evaluierung eines Designs, das es erst im Computer gibt.
2. Nach der Evaluierung Herstellung eines Design-basierten massiven Prototyps, der angefasst und bedient werden kann.
3. Vergleich des gedruckten Prototyps mit den Komponenten vorhandener Systeme, um sicherzustellen, dass er ordnungsgemäß passt und funktioniert.

Die Herstellung eines realen Objekts für die Evaluierung durch den Kunden beschleunigt den Vergleich neuer Designs. 3D-gedruckte Versionen alternativer Designs oder unterschiedliche Serien können sehr viel schneller reproduziert und verglichen werden, wodurch im Produktionsplan leicht Wochen eingespart werden können.

Häufig muss ein Prototyp nicht dieselbe Materialstärke aufweisen wie das endgültige Objekt. Ein Design aus Kunststoff oder Harz ist manchmal ausreichend, um ein Objekt zu testen, bevor in Arbeit und Material für die Herstellung aus Metall investiert wird. Goldschmiede und andere Designer können ihre Designs in Wachs oder biologisch abbaubarem Kunststoff für ein paar Cent testen – und dann das endgültige Modell aus Gold, Silber oder anderen wertvollen Materialien herstellen, nachdem der Kunde bestätigt hat, dass es passt und seinem Zweck entspricht (siehe Abbildung 3.2).

Prototypen aus dem 3D-Drucker können auch zusätzliche Details für die Produktevaluierung aufzeigen, beispielsweise unter Verwendung von Farben. Damit können Informationen wie





*Abbildung 3.1: Schnelles Prototyping für ein neues Design eines Armbands  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von FormLabs)*



*Abbildung 3.2: Individuelles Silberbesteck, für das vor der Anfertigung für den Kunden mithilfe von  
3D-Druck ein Prototyp hergestellt und getestet wurde  
(Bild mit freundlicher Genehmigung des Francis Bitoni Studios, Designer: Michael Schmidt,  
Architekt: Francis Bitoni)*

beispielsweise zur Spannungsbelastung oder thermische Messungen innerhalb eines strukturierten Objekts bei der nicht-technischen Prüfung deutlich aufgezeigt werden. Dies kann auch genutzt werden, um unterschiedliche Modelldesign-Optionen aufzuzeigen, um den visuellen Einfluss verschiedener künstlerischer oder farblicher Optionen zu verdeutlichen und um bereits vor der Produktion Marketingmaterial für ein Testpublikum anzufertigen.



## Direkte digitale Fertigung

Die Nutzung der additiven Fertigung zur Erstellung von Prototypen gestattet es, die verschiedenen Phasen des Designprozesses schnell zu durchlaufen. In einigen Fällen ist hier jedoch nicht das Ende. Bei Metallherstellungssystemen kann die additive Fertigung genutzt werden, um die endgültigen Produkte und Designs herzustellen, und nicht nur Prototypen aus Kunststoff. Bei diesem Ansatz können Details wie beispielsweise Seriennummern, markenabhängige Marketingdesigns und sogar ineinandergreifende und verbundene Strukturen in den physischen Aufbau des Produkts aufgenommen werden, wozu keine weiteren Werkzeuge außer dem 3D-Drucker benötigt werden.



Die Produktion eines einzigen, individuellen Designs, eines sogenannten *Einzelstücks*, oder anderer Produktionsläufe mit begrenzter Stückzahl für Sonderprodukte im Rennbereich, in der Medizin und in der Weltraumtechnologie, kann bei Anwendung der herkömmlichen Fertigung sehr kostspielig sein (siehe Abbildung 3.3). Wenn eine Form oder ein Werkzeug nur für ein paar wenige Stücke verwendet wird (womöglich nur für ein einziges), können keine Mengenvorteile genutzt werden, die bei der Massenfertigung die Stückkosten senken.



*Abbildung 3.3: Leichtes Einlasskühler-System für Rennautos, erstellt mit einer komplexen Anordnung von Hohlräumen im Inneren, um Gewicht zu sparen  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von WithinLab)*

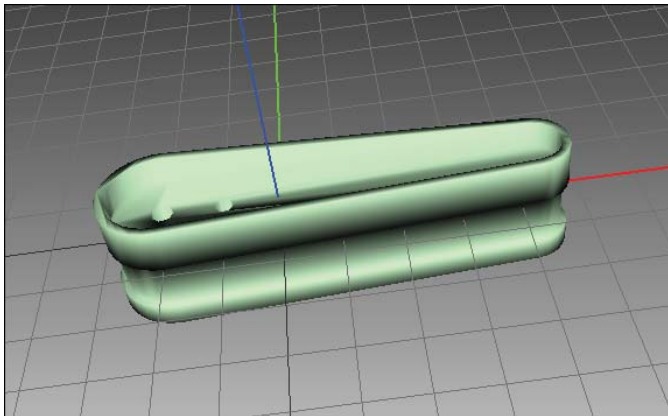
Mit der direkten digitalen Fertigung sind auch Aktualisierungen innerhalb eines Produktionszyklus möglich, ohne dass neue Werkzeuge für die Fertigungsstraße angefertigt werden müssen. Nachdem das digitale Modell abgeändert und in den 3D-Drucker hochgeladen wurde, weisen alle nachfolgend hergestellten Objekte die Änderung automatisch auf. GE nutzt diese

Möglichkeit seit einiger Zeit beim Design seiner zukünftigen Flugzeugdüsen, wo schnelle Aktualisierungen vorgenommen werden und die Fertigungsstraße nicht unterbrochen wird. Auf diese Weise wird bei der Produktion von Hochpräzisionskomponenten für den Motor Zeit gespart, weil mehrere Komponenten in einem Durchgang kombiniert und gedruckt werden können, ohne dass die herkömmlichen Methoden mit Löten und Schweißen angewendet werden müssen, um einzelne Baugruppen zu verbinden.

### *Wiederherstellung und Reparatur*

Die additive Fertigung hat ihren Platz in der aktuellen direkten digitalen Fertigung, sie kann aber auch genutzt werden, um Objekte herzustellen, die schon lange nicht mehr auf Lager gehalten werden, weil Platz für das nächstjährige Modell geschaffen werden musste.

Egal, ob es sich bei dieser Komponente um einen Kompressordeckel eines dampfbetriebenen Autos von Jay Leno aus dem letzten Jahrhundert handelt oder um ein Ersatzteil für einen Flipper. Beides wird schon lange nicht mehr hergestellt, obwohl es die Geräte immer noch gibt (siehe Abbildung 3.4). Scannt man jedoch die kaputten Teile eines vorhandenen Produkts ein oder erstellt man anhand der Abmessungen über CAD ein neues Ersatzteil, kann die additive Fertigung diesen alten Geräten neues Leben einhauchen. Dies ist vor Kurzem auch der NASA gelungen, als man einige neue Stücke der massiven handgeschweißten Saturn V-Motoren hergestellt hat, mit denen man einst zum Mond geflogen ist.



*Abbildung 3.4: Ersatzteil für einen alten Flipper, veröffentlicht als THING #1789 auf Thingiverse  
(einem riesigen Open Source-Angebot von 3D-Modellen)*

Durch die Anfertigung von Teilen, die als Ersatz für die Originalteile genutzt werden können, ist es zu guter Letzt sogar möglich, das Original zu verbessern, indem das reparierte Stück besser als ursprünglich gemacht wird – beispielsweise können neue Materialien verwendet werden, es können Verstärkungen eingeführt werden, und im Computer können beliebig viele

Anpassungen vorgenommen werden, bevor das Teil überhaupt hergestellt wird. Dank der Herstellung des Teils aus leichtem und kostengünstigem Kunststoff kann getestet werden, ob es passt, und es können weitere Anpassungen vorgenommen werden, bevor das endgültige Objekt in dem gewünschten Material hergestellt wird.

Das attraktive Potenzial dieser neuen Form des Ersatzteilmanagements ist, dass die Hersteller nicht mehr alle möglichen Teile in Lagern und an anderen Orten vorhalten müssen. Stattdessen laden sie einfach das Design für die benötigte Komponente herunter und drucken das Ersatzteil bei Bedarf aus. Statt Tagen oder Wochen, die vergehen, bis das richtige Ersatzteil an Ihren lokalen Händler geliefert wurde, rufen Sie einfach den Mechaniker an, um einen Termin für den Austausch zu vereinbaren, und man druckt das Teil direkt in der Werkstatt aus, wo es schon bereitsteht, wenn Sie dort ankommen.

Ein komplettes Lager mit lauter Einzelteilen kann auf diese Weise durch einen kleinen Bestand an Rohmaterialien und mehrere 3D-Drucker ersetzt werden. Man muss sich nicht mehr darum kümmern, ob wirklich alles auf Lager ist, und bei der Bereitstellung können unterschiedliche Materialien oder sogar personalisierte Designs angeboten werden, die abhängig von den Standardarmaturen oder Anschlüssen individuell erstellt werden (siehe Abbildung 3.5).



*Abbildung 3.5: Drei Trichter, um spezielle (proprietäre) Seifenspender mit ganz normaler (generischer) Seife füllen zu können, veröffentlicht als THING #32186 auf Thingiverse*

### *Proprietär wird zu generisch*

Eine weitere Möglichkeit, die durch den 3D-Druck geschaffen wird, ist die Herstellung von Anschlüssen und Armaturen, mit deren Hilfe proprietäre Behälter wiederverwendet werden können, indem sie mit kostengünstigen generischen Materialien gefüllt werden. Auf diese Weise können sie auch einem ganz anderen Zweck zugeführt werden, indem sie mit völlig anderen Materialien gefüllt werden. Dazu kann man beispielsweise die in Abbildung 3.5 gezeigten Trichter verwenden. Damit wird es problematisch für Hersteller, die ihre Waren basierend auf der Wiederauffüllung von Kartuschen kalkulieren. Und mit Sicherheit werden Garantieansprüche abgewiesen, wenn die Originalbehälter mit anderen als den Originalmaterialien gefüllt werden. Aber diese Form der Beschwerde kennt man bereits, sowohl von traditionellen »Refills« als auch von der Verwendung von Anschlüssen aus dem 3D-Drucker, mit deren Hilfe proprietäre Verbrauchsgüter aufgefüllt werden, oder auch, wenn andere als die Originalersatzteile für die Reparatur eines Motors verwendet werden oder generische Tinte für Tintenstrahldrucker im Büro.

3D-Drucker können also nicht nur genutzt werden, um veraltete Gerätschaften zu reparieren oder Ersatzteile auszudrucken, sondern auch für Fertigungstechniken, bei denen vorhandene Materialien und Komponenten wiederverwendet werden sollen. Um sie für den Verbraucher attraktiv zu machen, können sie der neuen Mode angepasst oder anderweitig personalisiert werden. Durch den Ausdruck eines neuen Gehäuses, einer neuen Abdeckung oder eines neuen Aufbaus können wir den Teufelskreis der stets neuen Modelle durchbrechen, wobei jeder versucht, seinen Nachbarn zu übertreffen. Auf diese Weise wird die grundlegende Warenproduktion in einigen Bereichen reduziert, aber die Verbraucher müssen auch nicht mehr so viel Geld ausgeben, um der Mode nachzueilen. Dagegen werden die Chancen für Designer und Boutiquen steigen, und individuelle Künstler können völlig neue Industriezweige schaffen, um die Personalisierung für die Verbraucher umzusetzen.

Die Zukunft könnte sich auf Industriebereiche konzentrieren, die Grundkomponenten herstellen und statt ständig neue Modelle auf den Markt zu werfen, immer wieder Aktualisierungen vornehmen und neue Materialien bei Abänderungen für eine mögliche Wiederverwendung unterstützen – egal, ob für Autos, Häuser, Möbel oder Kleidung.

### *Die Fertigung von Morgen – 3D-Druck*

Die Herstellung besserer und kostengünstigerer Waren für bereits vorhandene Produktionszyklen bietet zahlreiche Vorteile. Die wahre Leistung der additiven Fertigung liegt jedoch letztlich in den neuen Gelegenheiten, Produkten und Dienstleistungen, die mit dieser neuen Technologie möglich werden, sobald sie flächendeckend und leistungsfähig zur Verfügung stehen wird. Die folgenden Unterabschnitte beschreiben, welche Innovationen in naher Zukunft für den 3D-Druck möglich sind.

## Haushaltswaren

Nach heutigem Stand der Technik ist es beispielsweise bereits möglich, einen Hammer auf einem 3D-Drucker auszudrucken, um ein Foto an die Wand zu hängen. Bei dem Foto könnte es sich um einen 3D-Druck in Farbe handeln, aus der eigenen Sammlung, ausgedruckt als Objekt samt Rahmen – und sogar mit einer Abdeckung aus transparentem Kunststoff, damit es genauso wirkt wie ein gerahmtes Bild. Immer mehr Materialien und komplexe Baugruppen können mithilfe der additiven Fertigung hergestellt werden, von den Möbeln bis hin zu allen möglichen Gebrauchsgegenständen, in Farbe, Form und Funktion genau wie die Vorgaben aus der herkömmlichen Herstellung (siehe Abbildung 3.6).



*Abbildung 3.6: Ein Metalltisch, der Funktionalität und eine flüssige, komplexe Form verdeutlicht  
(Bild mit freundlicher Genehmigung des Francis Bitoni Studios, Designer: Michael Schmidt,  
Architekt: Francis Bitoni)*

Je fortschrittlicher die additive Fertigungstechnologie wird – bis zu dem Punkt, an dem komplexe Objekte aus mehreren Materialien gedruckt werden können, wie beispielsweise integrierte Schaltungen oder zusammengesetzte ineinandergreifende Strukturen –, desto größer ist die Palette »druckbarer« Objekte. Irgendwann wird es möglich sein, mit dem 3D-Drucker alle Objekte zu drucken, die wir im Haus brauchen – ebenso wie das Haus selbst.

## Gebäude

Bald schon werden sehr viel größere 3D-Drucker Beton ausgeben – nicht mehr nur für die Einrichtung, sondern für ganze Häuser. Bei Anwendung dieser Technik ist es nicht mehr

erforderlich, dass Menschen einzelne Komponenten zusammenbauen und diese dann an einem Fundament befestigen. Vielmehr kommt die gesamte Gebäudestruktur aus dem Drucker.

Abbildung 3.7 verdeutlicht dieses Konzept. Hier bewegt ein Portalkran die Spritzgussdüse über dem Bau, während dieser entsteht. Derzeitige Schätzungen anhand von Testausrüstung gehen davon aus, dass ein neues Haus innerhalb von nur 20 Stunden erstellt werden könnte. Das macht diese Technologie sehr attraktiv, zumal die zunehmende Bevölkerung neue Wohnungen braucht.



*Abbildung 3.7: Ein 3D-Drucker für Häuser  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von Contour Crafting)*

Notunterkünfte, die nach Naturkatastrophen wie beispielsweise Wirbelstürmen, Erdbeben oder Sturmfluten bereitgestellt werden, könnten durch feste Unterkünfte ersetzt werden, die aus natürlichen Materialien angefertigt werden, die vor Ort zur Verfügung stehen, wie in Abbildung 3.8 anhand offener Bögen gezeigt. Diese Abbildung zeigt kleine Strukturen, die entstanden sind, indem gebündeltes Sonnenlicht auf natürlichen Sand gerichtet wurde, wie man ihn an Stränden und in Wüsten auf der ganzen Welt findet. Der 3D-Drucker bewegt einfach den Fokuspunkt über den Sand, um einzelne Körner zu festen Strukturen zusammenzufügen.

Additive Fertigungstechniken gestatten außerdem den Aufbau komplexer Innenstrukturen und Leerräume, um Verdrahtung, Leitungsrohre und eine verbesserte Isolierung unterzubringen. Und sie sind dabei schneller und effizienter, als wenn diese Leerräume in herkömmlichen Betonplatten vorgesehen werden müssen, die in Holzrahmen gegossen werden. Abbildung 3.9





*Abbildung 3.8: Eine Struktur, die entsteht, indem Sand mithilfe von Sonnenlicht geschmolzen wird  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von Markus Kayser)*

zeigt die Anfertigung einer gerippten Betonwand, deren Lufttaschen einfach leer gelassen oder aber mit anderen Materialien gefüllt werden können (beispielsweise Schaum oder losem Mörtel), um einen besseren thermischen Schutz zu realisieren. Das bedeutet, dass dieselbe Stützkraft mit sehr viel weniger Material realisiert werden kann und ohne die ganzen Abfälle, Ausschnitte und Restmaterialien, wie sie beim herkömmlichen Fertigungsprozess übrig bleiben. Und irgendwann wird es auch möglich sein, die Leitungen und die Verdrahtung direkt innerhalb der Struktur herzustellen.

Schon heute sind wir kurz davor, unsere Häuser – oder ganze Wolkenkratzer – mit 3D-Druckern zu drucken, die an den Gebäuden hochklettern, die sie selbst bauen. Sie bewegen sich Stockwerk um Stockwerk nach oben (wie in Abbildung 3.10 gezeigt). Dieses Modell wird ganz in der Art gebaut, wie schon die alten Ägypter ihre atemberaubenden Pyramiden gebaut haben, aber solchermaßen gedruckte Gebäude könnten komplex geformte Wände haben, die die herkömmlichen Rahmenkonstruktionen völlig überfordern.

### **Vollständiges Recycling**

Neben der Verwendung nachhaltiger Materialien und der Vermeidung von Abfall wird es mit der additiven Fertigung bald möglich sein, alles herzustellen, was wir in einem Haus brauchen. Sie müssen also nicht mehr auf die herkömmliche Weise »umziehen«, wenn Sie Ihren Standort wechseln wollen. Sie packen einfach eine überschaubare Menge unersetzbarer Dinge ein



Abbildung 3.9: Gerippte Wände aus Beton aus dem 3D-Drucker  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von Contour Crafting)

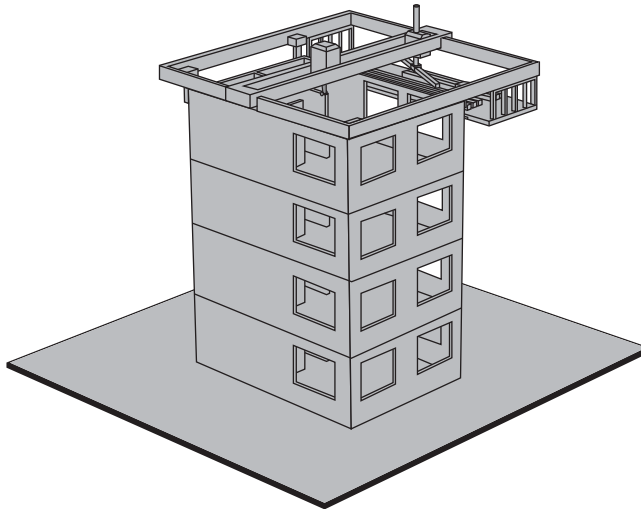


Abbildung 3.10: Mit während des Baus kletternden 3D-Druckern werden  
mehrstöckige Gebäude möglich sein.  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von Contour Crafting)



(beispielsweise die Zeichnungen Ihrer Kinder von der Kühlschrankschürze oder das Hochzeitskleid Ihrer Großmutter) und beauftragen dann einen Recycling-Service, alle Materialien und Komponenten aus Ihrem alten Haus samt Möbeln zu verwerten.

Und nachdem jeder Gegenstand gescannt und katalogisiert wurde, kann ein entsprechender Klon am neuen Standort hergestellt werden – vielleicht mit ein paar Änderungen, beispielsweise für ein neues Wohnzimmer. Bei dem Umzug an den neuen Standort müssen Sie sich noch nicht einmal an einen neuen Grundriss gewöhnen. Vielmehr werden Sie das Gefühl haben, nach Hause zu kommen, in dasselbe Haus mit denselben Dingen, nur an einem völlig anderen Ort. Hoffentlich haben Sie nette Nachbarn!

## **Formen und Gießen mit 3D-Druck**

Bis ein vollständiges Recycling möglich werden wird – wobei fast alles, was wir besitzen, nach Belieben reproduziert werden kann – ist es noch ein langer Weg, aber schon heute kann die additive Fertigung genutzt werden, um angepasste Gebrauchsgüter und viele Werkzeuge in traditionellen Produktionseinrichtungen herzustellen.

Aufgrund des erstaunlichen Detailgrads, der unter Verwendung kostengünstiger Kunststoffharze möglich ist, kann der 3D-Druck einfach genutzt werden, um komplexe Designs mit präzisen Details festzuhalten. Diese Modelle können nicht nur für das Prototyping genutzt werden, sondern auch, um präzise Formvorlagen für den Spritzguss von Massenwaren herzustellen.

Die Vorteile von digital hergestellten Dingen sind unter anderem:

- ✓ **Flexibilität:** Einzelne Formen können als Mehrfachformwerkzeuge immer wieder neu hergestellt werden, indem einfach mehrere Kopien des Grunddesigns im ComputermodeLL angelegt und dann das jeweils neue Modell ausgedruckt wird, vielleicht mit Verbesserungen von Eckradien oder mit neuen Kanälen, die die Durchflusseffizienz verbessern.
- ✓ **Wiederholbarkeit:** Wenn ältere Formen langsam schlechter werden (wenn beispielsweise die scharfen Kanten unscharf werden), können neue Formen hergestellt werden, die ganz genauso aussehen wie die alten Formen – selbst Jahre später.
- ✓ **Skalierbarkeit:** Digitale Designs können in jedem beliebigen Maßstab ausgedruckt werden. Es können also perfekte Duplikate in der halben oder doppelten Größe ausgedruckt werden – oder Duplikate mit spezifischen Verzerrungen, um eine spezialisierte Markenerkennung zu unterstützen (oder mit anderen künstlerischen Manipulationen der ursprünglichen Darstellung).

## **Verlorene Formen**

Die mit dem 3D-Drucker ausgedruckten Materialien wie Thermoplast oder Wachs können als verlorene Formen verwendet werden, beispielsweise bei Schmuckdesigns für Gold, Silber und andere wertvolle Materialien. Nachdem das endgültige Design im Computer erstellt

wurde, kann es ausgedruckt werden, komplett mit zusätzlichem Material, um Vertiefungen, Angusskegel, Angussöffnungen und Angusskanäle zu bilden, alles in einem einzigen Objekt. Dieses Objekt wird dann in Ton eingebettet, und nachdem der Ton gehärtet ist, kann die Form erhitzt werden, sodass der Kunststoff oder das Wachs aus der Form abfließen können. Auch hier ist die Wiederholbarkeit außerordentlich praktisch für die Massenproduktion, weil es nicht mehr nötig ist, Unterkomponenten zusammenzubauen, um komplexe Anordnungen aus Innenstruktur und Hohlräumen in permanenten Formen zu schaffen.

### ***Gesinterte Metalleinbringung***

Für künstlerische Metalldesigns kann kostengünstiges Granulatmaterial wie beispielsweise Stahl in eine feste Form gesintert werden. Weil das Material beim Sintern nicht vollständig geschmolzen werden muss, ist das resultierende gesinterte Objekt im Wesentlichen ein poröses Netz aus Stahlpartikeln, die zu der gewünschten Form zusammengesetzt wurden. Das kann, abhängig von dem für das Sintern verwendeten Granulatmaterial, eine sehr zerbrechliche Angelegenheit sein. Durch die Einbettung dieser Objekte in Tonerde kann später das vom Künstler gewünschte Material, wie beispielsweise Bronze, in die Form gegossen werden, wobei die durch das Stahlgranulat definierten Leerräume gefüllt werden. Nach dem Polieren kann die resultierende Metallmischung eine Legierung mit den gewünschten künstlerischen oder materialbedingten Charakteristika bilden. Solche Prozesse können Materialien mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften verbinden, die bei der herkömmlichen Formung durch das Einspritzen von Legierung nicht möglich wären.

### ***Künstlerische Noten und Personalisierung***

Die Möglichkeit, personalisierte Einzelstücke herzustellen oder Produktionsläufe mit geringen Stückzahlen und kleinen Variationen zu fahren, trägt dazu bei, Designs zu personalisieren, um ihnen spezielle Eigenschaften mitzugeben. Dabei kann es sich um Herstellungsdetails handeln, wie beispielsweise Logos oder Seriennummern, die direkt auf dem Objekt aufgebracht werden, oder um komplexe Materialformen, die mit herkömmlichem Formen, Gießen und Biegen nicht möglich sind.

### ***Medizinische Implantate***

Die vielleicht variabelste, am weitesten personalisierte und spezialisierte Anwendung der additiven Fertigung ist die Herstellung medizinischer Implantate, die eine Funktion erfüllen müssen, während sie perfekt mit den organischen Strukturen des Körpers harmonisieren (siehe Abbildung 3.11).

Der 3D-Druck ist nur durch die Gesamtgröße eines Objekts begrenzt. Die interne Geometrie des Objekts kann also massiv sein, wie bei einem herkömmlichen Gussobjekt, aber auch hohl und sehr viel komplexer. Das Ergebnis ist, dass man schneller in der Lage ist, ein Objekt mit optimalem Gleichgewicht zwischen Stärke und Gewichtseinsparung zu erschaffen. Bei medizinischen Implantaten werden häufig Metalle verwendet, weil sie nicht auf die natürlichen

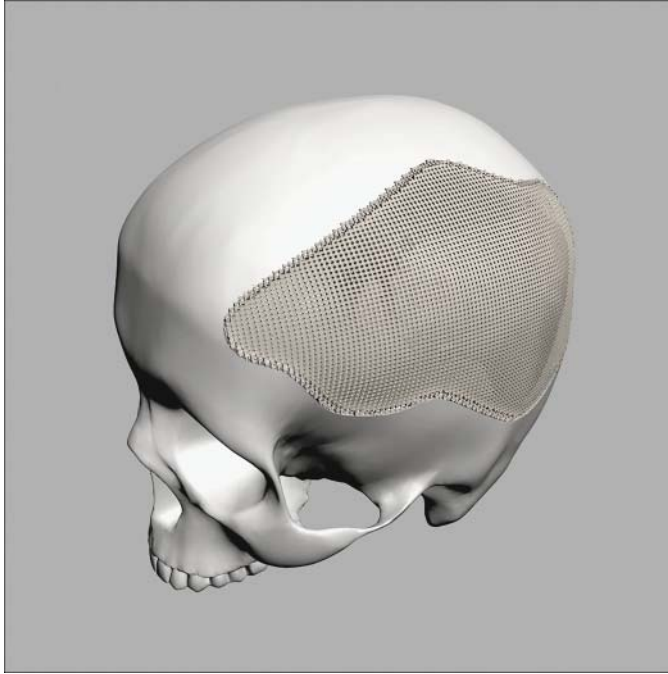


Abbildung 3.11: Ein spezialisiertes 3D-gedrucktes Schädelplatten-Implantat mit poröser Struktur  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von WithinLab)

Prozesse des Körpers reagieren. Metalle wie Titan sind sehr gebräuchlich, aber sie haben einen so hohen Schmelzpunkt, dass die meisten Designs bisher als massive Teile gegossen werden. Dieser Ansatz ist nicht nur sehr kostspielig, sondern birgt auch die Gefahr einer postoperativen Schädigung durch Vibration und Bewegung des Implantats gegen biologische Materialien wie etwa Knochen.

Abbildung 3.12 zeigt ein Beispiel, bei dem WithinLabs ein *selektives Laser-Sintering (SLS)* angewendet hat, um ein künstliches Hüftimplantat aus Titan in einem 3D-Drucker herzustellen. Dieses Implantat weist eine höchst komplexe Metallgeometrie auf, die es zulässt, dass Knochen in das Implantat einwachsen können, und damit eine verbesserte Verbindung entsteht mit größerer mechanischer Stärke, als sie durch die herkömmlichen Schrauben und Kleber realisiert werden kann.

### Personalisierung von Objekten

Die Personalisierung ist nicht auf iPhone-Gehäuse und andere Gebrauchsgegenstände begrenzt. Eine weitere, sehr viel umfangreicher spezialisierte Anwendung ist die biologische Prothetik für Rekonstruktionszwecke oder für den Ersatz fehlender Extremitäten.

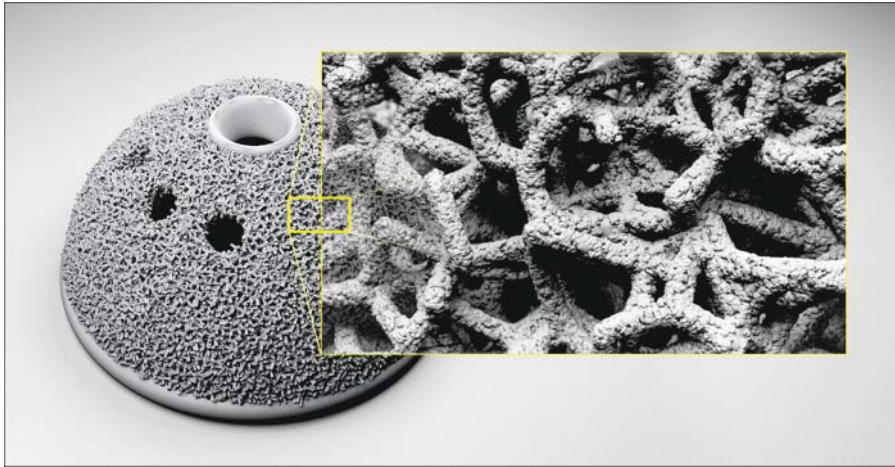


Abbildung 3.12: Ein Implantat für eine Hüftgelenkspfanne mit komplexen Metallgittern  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von WithinLab)

Nach einer massiven Verletzung gestattet der 3D-Druck die Nachbildung der Funktionen eines Menschen anhand von alten Fotos oder durch eine Modellierung unter Berücksichtigung noch vorhandener Körperteile. Diese Technik kann Menschen die Möglichkeit zurückgeben, zu essen oder zu trinken, deren Gesichtsgewebe zerstört wurde, oder ein völlig neues Ohr zu schaffen für Menschen mit *Microtia* (einem funktionalen Innenohr aber ohne Außenohr, was einen Gehörschaden oder einen Hörverlust bewirken kann). Forscher, die sich mit 3D-Biodruckern beschäftigen, testen gerade unter Verwendung von Collagen und lebenden Zellen biologisch entwickelte Ohren, womit eine neue Knorpelstruktur gebildet wird, die implantiert werden kann, um die ordnungsgemäße Funktion wiederherzustellen.

Die externe Prothese für den Ersatz von Extremitäten war bisher kaum mehr als ein Festkörper mit so vielen Gelenken, wie die Entwickler einbauen konnten. Ein Unternehmen namens Bespoke hat damit begonnen, benutzerdefinierte Abdeckungen zu schaffen, sogenannte Fairings, die entworfen werden, indem ein 3D-Modell nach einem Scan der verbleibenden Extremität erstellt wird. Durch die Spiegelung der noch vorhandenen Extremität integriert das Design von Bespoke künstlerische Entwürfe zu einem ausgeglichenen Erscheinungsbild, geschaffen von einem Künstler in Zusammenarbeit mit dem Empfänger. Fairings können aus Kunststoff oder aus verchromtem Metall hergestellt werden, wobei der 3D-Drucker ein Aussehen schafft, das genau den persönlichen Vorlieben des Empfängers entspricht (siehe Abbildung 3.13).

### Kleidung und Textilien

Mittlerweile entwickeln Künstler neue Materialien, wie beispielsweise 3D-gedrucktes Leder und flexible Gitterstoffe, die in personalisierter Kleidung oder in personalisierten Schuhen getragen werden können, die genau an den Körper des Trägers angepasst sind.



*Abbildung 3.13: Ein Beispiel für ein personalisiertes Prothesen-Fairing mit sehr künstlerischem Design und als Spiegelung des zweiten Beins angelegt*

Der Designer Michael Schmidt und der Architekt Francis Bitoni haben zusammengearbeitet, um ein atemberaubendes Abendkleid aus dem 3D-Drucker zu kreieren, das genau an die Proportionen des Models Dita von Teese angepasst ist, wie in Abbildung 3.14 gezeigt. Dieses Kleid wurde unter Verwendung eines gekrümmten Gitternetz-Designs, basierend auf der Fibonacci-Folge, erschaffen, einer mathematischen Relation, die viele der schönsten Formen der Natur definiert. Durch die Anwendung des Gitters auf einen Scan des Körpers des Models konnte ein Gewebe aus dem 3D-Drucker erstellt werden, komplett mit ineinandergreifenden flexiblen Gelenken, die sich perfekt um sie herum hüllen.

Im Moment ist es noch so, dass der Künstler das Kleid mithilfe von Swarovski-Kristallen für den Laufsteg aufgepeppt hat, aber Fortschritte im Bereich der Multimaterialdrucker machen diese Behandlung in der nahen Zukunft schon überflüssig. Wenn diese Technologie erst gebräuchlicher geworden ist, gehen wir einfach in einen für unsere Konfektionsgröße ausreichenden Scanner, wählen das gewünschte Material aus und erhalten dann eine maßgeschneiderte 3D-Druck-Hose, die am Bauch nicht kneift und an der Hüfte nicht rutscht – ganz unabhängig davon, welche Größe wir brauchen.

## ***Bereitstellung von Technologie an strategischen Standorten***

Die Anpassung geht jedoch weit über die Personalisierung von Objekten, Implantaten und Kleidung hinaus, und es ist fast jedes Design für jedes Objekt oder jedes Gerät möglich.



*Abbildung 3.14: Ein Abendkleid aus dem 3D-Drucker für Model Dita von Teese  
(Bild mit freundlicher Genehmigung des Francis Bitoni Studios, Designer: Michael Schmidt,  
Architekt: Francis Bitoni)*

Größtenteils treten die Probleme ja erst auf, wenn ein Design bereits in der Praxis eingesetzt wird, was sehr unangenehm sein kann, wenn der Herstellungsort unerreichbar und weit weg ist.

### **Militärische Fertigung**

Die Schiffe der U.S. Navy befinden sich häufig lange Zeit weit entfernt vom Festland, und manchmal brauchen sie Teile oder Anpassungen, die nicht unmittelbar zur Verfügung stehen. Einige Schiffe verwenden heute schon an Bord additive Fertigungssysteme, um einen Prototyp der Anpassung zu erstellen und direkt digitale Komponenten anzufertigen, die für den Betrieb notwendig sind.

Irgendwann werden die Verbesserungen im Bereich der additiven Fertigung es gestatten, Reparaturen an Ausrüstung vor Ort vorzunehmen, die derzeit ohne umfangreichere Arbeiten in einer Werkstatt nicht möglich sind. Beispielsweise verwendet man beim Metallüberzug

diesen Prozess, um einem vorhandenen Objekt aus Metall Material hinzuzufügen, womit die Reparatur von beschädigter oder korrodierter mechanischer Ausrüstung möglich wird. Beispielsweise könnten U-Boote mit speziellen 3D-Druckern ausgestattet werden, die innerhalb der Leerräume zwischen der Innen- und der Außenhülle herumkriechen und während des Einsatzes Reparaturen durchführen, wie sie momentan unmöglich sind.

Vergleichbare Anforderungen gibt es auch im Hinblick auf kleinere Ausrüstung. Aus diesem Grund hat die U.S. Army das Mobile Expeditionary Lab erschaffen, einen sechs Meter langen Transportcontainer, der mit Schnellfertigungssystemen ausgestattet ist, die von Soldaten im Einsatz benutzt werden können, denen in Konfliktgebieten keine Ersatzteillager und Metallwerkstätten zur Verfügung stehen. Frühe Erfolge dieser Möglichkeit waren die Erstellung neuer Klammern, die verhindern, dass die Taschenlampe eines Soldaten versehentlich eingeschaltet wird, während er sich im Manöver befindet. Die Bereitstellung dieser Möglichkeit vor Ort kann am besten spezielle Anforderungen identifizieren und Entwürfe testen, wie sie unmittelbar benötigt werden (beispielsweise in einer Wüste im Gegensatz zu einem Dschungel). Momentan dauert es mehrere Tage, bis die Army ein neues Produkt, eine neue Komponente oder ein Update einsetzen kann. Die Entwürfe aus dem Lab werden an den Heimatstandort der Rapid Equipping Force hochgeladen, wo sie überprüft, aktualisiert oder zur vollständigen Fertigung weitergegeben werden können, was eine wesentlich kürzere Kette zwischen den Truppen und der Ausrüstungseinheit bedeutet.

## Im Weltraum

Wenige Lebensräume stellen eine größere Herausforderung dar als Reisen im Weltraum, wenn wir unseren eigenen Planeten verlassen und den Mond, den Mars und weitere Galaxien besuchen. Wenn der einzige Schraubenschlüssel, der zu dem Funkmast passt, während der Reparaturarbeiten verlorengeht, ist es außergewöhnlich schwierig, einen Ersatz zu bestellen. Kein Wunder, dass sich die NASA und andere Raumfahrtorganisationen für die additive Fertigung interessieren. In der Lage zu sein, vor Ort Dinge herzustellen, die die Astronauten gerade brauchen, und dies mit grundlegenden Materialien und mithilfe eines 3D-Druckers, der in der Schwerelosigkeit oder im Vakuum funktioniert, ist eine potenziell überlebenswichtige Fähigkeit der zukünftigen Raumfahrt.

Die Kosten, etwas von der Erde in das Weltall zu schaffen, sind immer noch (gestatten Sie uns das Wortspiel) astronomisch. Wenn wir eine Mission planen, die einen anderen Planeten erforschen soll, ist es sehr attraktiv, ursprüngliche Materialien zu verwenden, wie beispielsweise Mondgestein (den sogenannten *Regolith*), und Energie von der Sonne zu nutzen. Wenn wir dieselben Systeme, wie wir sie hier auf der Erde mit Sand und Gestein betreiben, auch auf dem Mond nutzen können, dann könnten wir Robotersysteme vorausschicken, damit sie Straßen und Gebäude drucken, um eine Infrastruktur für unsere Astronauten zu schaffen, ohne dass weitere Kosten dafür anfallen, Material in den Weltall zu schaffen (siehe Abbildung 3.15 und Abbildung 3.16).





Abbildung 3.15: Straßen- und Gebäudebau auf dem Mond unter Verwendung der additiven Fertigung  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von Contour Crafting)



Abbildung 3.16: Ein Modell eines Wohnhauses auf dem Mond, gedruckt aus Beton  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von Contour Crafting)





## Teil II

# Ressourcen für den 3D-Druck



## *In diesem Teil ...*

- ✓ Überblick über die verschiedenen Materialien für den 3D-Druck, unter anderem Thermoplaste und Nylon, flüssige Fotopolymere und Trockengranulat für Metall- und Keramikobjekte.
- ✓ Betrachtung verschiedener Methoden, um 3D-Modelle zu erstellen oder aufzunehmen, wie beispielsweise Scan, Design mit CAD-Software und Vermessung zur Formgebung unter Verwendung mehrerer Fotos.
- ✓ Überblick über die Möglichkeiten im Bioprinting, womit wir eines Tages Nahrungsmittel, tierische Produkte und sogar Gewebe und Organe drucken können.
- ✓ Übersicht darüber, wo Sie auf dem 3D-Drucker ausdruckbare Objekte finden, wie beispielsweise im Internet oder in Onlineverzeichnissen.
- ✓ Wie Sie 3D-Objekte für sich selbst finden oder druckbar machen.

# Materialien für den 3D-Druck

# 4

## In diesem Kapitel

- ▶ Extrudierte stranggepresste Materialien auflisten
- ▶ Granulate identifizieren
- ▶ Lichtgehärtete Harze kennenlernen
- ▶ Bioprinting verstehen
- ▶ Alternative Materialien kennenlernen

**O**bwohl der 3D-Druck noch in seinen Kinderschuhen steckt, nimmt die Anzahl der dafür verfügbaren Materialien rapide zu – fast jede Woche tauchen neue Möglichkeiten auf. In den letzten Kapiteln dieses Buches werden wir beschreiben, wie Sie Ihren eigenen 3D-Drucker bauen, der unter Verwendung von Kunststofffäden feste Objekte herstellt.

Die Temperatur für das Schmelzen wird durch den für den 3D-Druck verwendeten Thermoplasttyp bestimmt. Die Schmelztemperatur wiederum wirkt sich auf die Stärke des fertigen Objekts aus, ebenso wie die Art der Oberfläche, die für die erste Schicht benötigt wird, um dem Druckprozess standzuhalten. In einem 3D-Drucker wird nur die erste Stufe des Extruders aufgeheizt, und der Faden behält Umgebungstemperatur, bis er das heiße Ende des FFF/FDM-Extruders erreicht.

Die Umgebungslufttemperatur kann sich auf die Qualität des fertigen Produkts auswirken, wobei einige professionelle Drucker ein umschlossenes Bauvolumen aufheizen (den maximalen Raum, innerhalb dessen ein 3D-Drucker Festkörper anfertigen kann), damit sich die neuen Schichten besser mit den vorhergehenden Schichten verbinden können. In einigen Druckern kann die Aufbauplatte aufgeheizt werden, sodass die erste Schicht an der Platte haftet und sich nicht ablöst, aber die Aufbauplatte kann auch mit einem Material beschichtet werden, um für eine bessere Haftung des Kunststoffs zu sorgen. Einige Fäden können das allgemeine Druckermaterial verwenden, um dafür zu sorgen, dass die erste Schicht haftet, sodass das Objekt während des Druckprozesses nicht verrutscht, während andere Fäden aus einem exotischeren Material bestehen müssen, wie beispielsweise das wärmebeständige Polyimid-Kapton-Band DuPont, das für die Raumanzüge der NASA entwickelt wurde.

Andere Materialien, die häufig eingesetzt werden, um eine feste Verbindung der ersten Schicht zu unterstützen, sind unter anderem ABS-Zement, Haarspray und sogar Rest-Kunststofffäden, die in einem geeigneten Lösungsmittel aufgelöst und auf die Aufbauplatte gepinselt werden, um einen dünnen Film zu erzeugen. Das Material muss einfach nur mit dem verwendeten Thermoplast kompatibel sein.

Bei anderen 3D-Druckertypen werden schon im Prozess Schichtenbinder eingesetzt (zum Beispiel bindet SLA die Flüssigkeit an die Aufbauplattform, während sie gehärtet wird), oder

sie sind einfach nicht notwendig, wie beispielsweise beim Binden von Granulat, wo das nicht gebundene Pulver das Objekt während des Drucks stabilisiert. Die Vielfalt der Techniken für die Sicherung eines Drucks ganz zu Beginn spiegelt die Vielfalt der Materialtypen wider, die bei der Herstellung des Objekts genutzt werden können, ebenso wie die verschiedenen Materialtypen, die es für die verschiedenen Herstellungstypen gibt.

### Extrudierte stranggepresste Materialien

Wie in Kapitel 2 bereits angesprochen, verwenden FDM-Systeme (Fused Deposition Modeling) wie die RepRap-3D-Drucker (den wir in Kapitel 12 bauen werden) stranggepresste Materialien, wie beispielsweise geschmolzenes Thermoplast, um Objekte zu erzeugen. Obwohl heute die Thermokunststoffe die gebräuchlichsten Fadentypen sind, werden täglich neue Fadentypen angeboten.

Fäden, wie in Abbildung 4.1 gezeigt, sind im Allgemeinen auf Kunststoffspulen aufgewickelt und mit 1,75 mm oder 3 mm Durchmesser erhältlich, aber wählen Sie Ihr Material sorgfältig aus! Viele Probleme beim 3D-Druck können direkt Problemen mit den Fäden zugeordnet werden:

- ✓ Bei einem minderwertigen Herstellungsprozess der Fäden kann es vorkommen, dass die Fäden auf die Spule aufgebracht werden, während sie noch leicht formbar sind, sodass sie in ovaler Form um die Spulenachse gewickelt werden.
- ✓ Wenn die Fäden in ungleichmäßigen Stärken extrudiert werden, kann das gedruckte Objekt dadurch beschädigt werden.
- ✓ Verschmutzte Fäden können Schmutz in den Extruder einbringen.

Professionelle (und auch viele für Verbraucher geeignete) 3D-Drucker verwenden nur Fäden aus vorgespulnten Kartuschen. Die Qualität dieser Fäden wird sorgfältiger kontrolliert und sie sind durch das Kartuschengehäuse geschützt, aber sie sind teurer und bieten weniger Optionen als generische Fäden.

### Thermoplaste

Thermoplaste machen die meisten beim FDM verwendeten Fäden aus. Fäden aus solchen thermoplastischen Materialien können in vielen verschiedenen Farben erzeugt werden, selbst durchsichtig oder im Dunkeln leuchtend.



Abweichungen in den Materialqualitäten der verschiedenen Fadentypen verursachen potenzielle Probleme, wenn Sie innerhalb eines Drucks von einem Fadentyp auf einen anderen umsteigen (zum Beispiel von PLA auf ABS). Dennoch steigert die Unterbrechung eines Ausdrucks, um einen Faden einer anderen Farbe zu verwenden, häufig die Attraktivität des Endprodukts. Abbildung 4.2 zeigt eine Spielzeugschraube für Kinder, für die der Druck aus einem anderen Grund unterbrochen wird – die Mutter wird der Schraube hinzugefügt, während sie hergestellt wird.



Abbildung 4.1: Spulen mit Thermoplast-Fäden aus unterschiedlichen Materialien, unter anderem PLA, ABS und Nylon

### PLA (Polyactid)

Eines der gebräuchlichsten Thermoplaste für den 3D-Druck ist PLA (Polyactid, auch Polymilchsäure), ein umweltfreundliches und biologisch abbaubares Polymer, das aus Pflanzenzuckern von Pflanzen wie Tapioka, Getreide und Zuckerrohr gewonnen wird. Dieses Material kann unter Verwendung eines mit dem Druckerband abgedeckten Druckbetts gedruckt werden und benötigt keine heizbare Aufbauplatte. PLA schmilzt bei einer sehr geringen Temperatur von ca. 160 Grad Celsius, bindet allerdings besser bei ca. 180 Grad Celsius. Die meisten PLA-Drucker richten einen kleinen Lüfter auf den Extruder, um das Material beim Auftrag zu kühlen, womit verhindert werden soll, dass das heiße Ende des Extruders die vorherigen Schichten wieder aufschmilzt.



PLA kann etwas spröder als andere Thermoplaste sein. Es werden jedoch bereits spezielle Varianten entwickelt, die mehr Flexibilität bieten, und bei deren Herstellung weniger Kohlenstoffemission entsteht. PLA ist beliebt in ärmeren Gegenden der Erde, weil es ganz einfach aus beliebigen natürlichen Pflanzenzuckern hergestellt werden kann, die vor Ort zur Verfügung stehen. PLA wird in vielen unterentwickelten Ländern verwendet, um Regenwassertonnen und Rohrmontagen herzustellen, ebenso wie einfache Sanitärprodukte, wie beispielsweise Toilettensitze. Es ist etwas spröder als ABS, weniger flexibel als Nylon und bleibt damit eine der vielen Optionen, die heute in den entwickelten Ländern eingesetzt werden können.



*Abbildung 4.2: Ein Spielzeug, ausgedruckt auf einem 3D-Drucker, mit gedruckter Mutter, die auf eine Schraube mit zwei Köpfen aufgebracht wurde, indem der Druck der Schraube unterbrochen wurde, um die Mutter in einer anderen Farbe zu drucken*

*(Modell: Thing #13923 in Thingiverse, freigegeben unter Creative Commons-Lizenz von seinem Designer Aeva)*

### **ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol)**

ABS-Kunststoff wird in vielen industriellen Anwendungen für die Extrudier- und Spritzgussformung verwendet, wie beispielsweise für die beliebten Lego-Steine. Seine Eigenschaften sind also bekannt und die Qualität des Fadens kann bei der Herstellung besser kontrolliert werden.

- ✓ ABS schmilzt bei einer höheren Temperatur als PLA (150 Grad Celsius, bindet aber besser bei 220 – 225 Grad Celsius).
- ✓ Es kann leichter extrudiert werden und erzeugt weniger Reibung, wenn es durch den Extruder gepresst wird.
- ✓ Es kann auf Kapton-Band oder eine dünne Schicht ABS-Zement gedruckt werden.



ABS-Kunststoff schrumpft beim Abkühlen. Eine aufgeheizte Aufbauplatte erzeugt also bessere Ergebnisse, weil sie die Kontraktion der ersten Schichten begrenzt, sodass eine Verzerrung größerer Objekte vermieden wird.



Wenn ABS in geschlossenen Räumen verarbeitet wird, gibt es bei der Extrusion einen schwachen Geruch ab, der gegen Chemikalien empfindliche Tiere und Menschen beeinträchtigen kann. Man geht auch davon aus, dass ABS mehr in der Luft gelöste Mikropartikel erzeugt als PLA, wenn kein geeigneter Filter verwendet wird.

### PC (Polycarbonat)

Polycarbonat-Materialien wie beispielsweise Lexan sind die neueste Variante der für 3D-Druckerfäden angebotenen Thermoplaste. Polycarbonat-Anwendungen sind unter anderem CD- und DVD-Datenträger sowie Komponenten für Autos und Flugzeuge, weil sie robuster gegenüber Kratzern und Stößen sind. Für diese höhere Stärke und Haltbarkeit sind jedoch auch höhere Extrudertemperaturen erforderlich, nämlich 260 Grad Celsius und mehr, was einige Drucker nicht aushalten. Polycarbonat-Kunststoffe werden bei der Herstellung von »kugelsicherem Glas« verwendet, das in Formen gegossen wird. Bei der Schichtung in 3D-Druckern entstehen jedoch mikroskopisch kleine Leerräume zwischen den Schichten, sodass das Endergebnis nicht so stark wie die geformten Komponenten aus der Industrie ist. Polycarbonat-Objekte können außerdem ihre Form verändern, wenn sie ultraviolettem Licht ausgesetzt sind und mit der Zeit undurchsichtiger und spröde werden.

### Polyamide (Nylon)

Nylonfaden ist ebenfalls eine der neueren Varianten für den 3D-Druck und insbesondere für Objekte geeignet, für die Flexibilität und eine starke Haftung zwischen den einzelnen Schichten erforderlich ist. Die Extrusion von Nylon-Thermoplastfäden muss bei Temperaturen zwischen 240 und 270 Grad Celsius stattfinden. Sie bieten eine hervorragende Haftung zwischen den Schichten. Darüber hinaus ist Nylon widerstandsfähig gegenüber Aceton, das Materialien wie ABS und PLA auflöst. Darüber hinaus können Polyamid-Materialien undurchsichtig, durchsichtig oder sogar mit unterschiedlichen Farben gefärbt werden. Für Nylonfäden können die gebräuchlichsten Textilfarben verwendet werden. Dank seiner Widerstandsfähigkeit gegenüber Aceton als Lösungsmittel können mit Nylon anpassungsfähige Gebrauchsgegenstände hergestellt werden, wie beispielsweise Vasen oder Tassen, weil die ausgezeichnete Haftung zwischen den Schichten hilft, wasserdichte Objekte zu schaffen.

Der Nylonfaden von Richard (Abbildung 4.3) ermöglicht, einzigartige Objekte zu schaffen, mit Farbkombinationen innerhalb des Fadens, sodass es nicht erforderlich ist, Drucker anzuhalten und die Fäden zu wechseln, um unterschiedliche Farben zu erhalten. Das ist sehr beliebt bei privaten Anwendern des 3D-Drucks, weil Textilfarben überall erhältlich sind.

### PVA (Polyvinylalkohol)

Eine beliebte Option für einen wasserlöslichen Träger ist Polyvinylalkohol, ein biologisch abbaubares, industrielles, haftendes Material, das bei 180 und 200 Grad Celsius ausgepresst wird. Einige Varianten von PVA sind leitend und können verwendet werden, um Schaltkreise direkt per 3D-Druck auf die hergestellten Objekte aufzubringen. Mit PVA gedrucktes Material löst





*Abbildung 4.3: Ein gefärbtes Nylon-Objekt aus dem 3D-Drucker, wobei handelsübliche Textilfarben verwendet wurden*

sich jedoch in Wasser einfach auf und muss deshalb von der normalen Luftfeuchtigkeit isoliert werden. PVA wird häufig als Trägermaterial für andere Thermoplasttypen verwendet, das später einfach in Wasser gelöst werden und damit das fertige Kunststoffobjekt freigeben kann.

### ***HIPS (High Impact Polystyrene, hochschlagfestes Polystyrol)***

Ein weiteres lösliches Material, das es erst seit Kurzem gibt, ist HIPS, eine Styrolvariante. Es wird auch für Verpackungsmaterial und Nahrungsmittelverpackungen verwendet. HIPS hat ähnliche Eigenschaften wie ABS, wird aber in Limonen gelöst, einem biologischen Lösungsmittel aus Zitruspflanzen, und nicht in Aceton, wie ABS. HIPS-Faden ist relativ neu und sein Einsatz ist noch in der Experimentierphase. Wie PVA wird HIPS hauptsächlich als löslicher Trägerstoff in Kombination mit anderen Thermoplasttypen verwendet.

### ***HDPE (High-Density Polyethylene, Polyethylen mit hoher Dichte)***

HDPE ist das Thermoplast-Material, aus dem Flaschen und andere recycelbare Artikel mit der Kennzeichnung »2« hergestellt werden. HDPE findet man in allen Recycling-Tonnen und auf Müllhalden, deshalb wird die Verwendung von HDPE, das aus Recyclingstoffen gewonnen wird, wie beispielsweise Milchtüten, immer interessanter. HDPE verbindet sich ganz einfach mit sich selbst, aber eher schlecht mit anderen Materialien, deshalb muss häufig eine

HDPE-Folie als Aufbauplatte verwendet werden. Die Arbeit mit HDPE ist kompliziert, deshalb ist es für 3D-Drucker nicht gebräuchlich, aber seine enorme Verfügbarkeit als Nebenprodukt vieler industrieller Anwendungen bewirkt, dass verstärkt versucht wird, dieses Material für die additive Fertigung zu nutzen – insbesondere für die Zeit, wenn mehr private Faden-Extruder eingesetzt werden.

Studenten an der Universität von Washington haben extrudiertes HDPE verwendet, um Boote für eine lokale Milchtüten-Regatta zu bauen. Und vor Kurzem haben sie einen Wettbewerb gewonnen, für den sie recyceltes HDPE in 3D-Druckern verarbeitet haben, um Toilettensitze und Bauteile für Wasserauffangbecken für die Dritte Welt zu bauen. Die enorme Verfügbarkeit von Behältern, die aus HDPE hergestellt wurden, macht dieses Material durch Recycling in vielen Regionen der Erde verfügbar, sodass der Müll eines Landes in nützliche Gegenstände umgewandelt werden kann, sobald die Techniken für die Anpassung des recycelten HDPE für den 3D-Druck erst ausgereifter sein werden.

### *Experimentelle Materialien*

In letzter Zeit erhält der 3D-Druck immer mehr Aufmerksamkeit, weshalb auch immer mehr Material dafür entwickelt wird. Unter anderem sind Varianten von PLA und ABS mit neuen Eigenschaften und Funktionen entstanden, ebenso wie flexible PLA-Varianten. Es gibt sogar Material, das einen bestimmten Duft für das fertige Objekt erzeugt. ABS-Varianten sind unter anderem im Dunkeln leuchtende Materialien oder Farbdioden-Materialien, die ihre Farbe abhängig von der Temperatur wechseln, wie man es von den Stimmungsringen der 70er-Jahre kennt, ebenso wie Kohlefaserverbundstoffe, die leitfähiges 3D-Druckmaterial liefern, das für eine eingebettete Elektronik geeignet ist.

Verbundstoffe können Ergebnisse erzielen, die ganz natürlich aussehen. Ein Beispiel dafür ist die Verwendung von Holzfasern in dem experimentellen LayWood-D3-Faden, der einen extrudierten Festkörper erzeugt, der sandgestrahlt und wie echtes Holz lackiert werden kann. Abhängig von der Temperatur am heißen Ende während des Drucks können dunklere und hellere Schichten ineinander verlaufen und damit Holzfaser-ähnliche Maserungen an den fertigen Objekten erzeugen. Ein deutscher Forscher, Kai Parthy, hat außerdem neue Materialien für die Modellanfertigung in der Architektur geschaffen, die wie Sandstein aussehen, ebenso wie für extrudierte Objekte, die verformbar und transparent sind – geeignet für zuhause gedruckte Hohllichtleiter, die in 3D-gedruckte Objekte eingebettet werden.

3D-gedruckte Hohllichtleiter aus transparentem 3D-gedrucktem Kunststoff werden von The Walt Disney Company für ihre bemerkenswerten Printed Optics (siehe Abbildung 4.4) verwendet, um eine kühle Niederspannungs-LED-Beleuchtung direkt in ihre Ausstellungsstücke einzubringen, wie es mit der herkömmlichen Glühbirne einfach nicht möglich ist. Das Printed Optics-Programm entwickelt diese Technologie weiter, um Spielzeug noch besser auf Kinder reagieren zu lassen, indem den traditionellen Komponenten ihrer Themenparkmotive noch interaktivere Elemente hinzugefügt werden. Außerdem soll damit eine Beleuchtung mit LEDs mit niedrigerer Leistung geschaffen werden, die noch individueller auf spezifische Zwecke in ihren Ausstellungen ausgelegt ist.

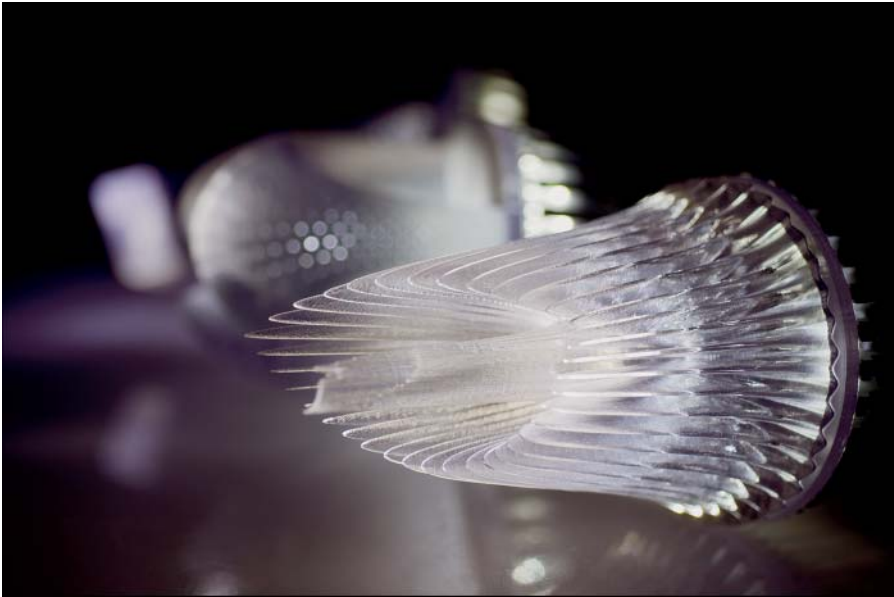


Abbildung 4.4: 3D-gedruckte Leuchthohlröhren im Printed Optics-Programm von Disney, das Alternativen zur herkömmlichen Beleuchtung mit Glühbirnen entwickelt  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von The Walt Disney Company)

### Extrudierte Alternativen

Neben den Thermoplast-Materialien gibt es noch weitere Optionen für den 3D-Druck, wie beispielsweise Pasten, Gels und sogar Ton und Ton-Ersatzstoff, wie etwa Play-Doh. Der Hyrel 3D-Drucker kann Objekte ausgeben, die aus luftgetrocknetem Ton und Knetmasse hergestellt werden, indem über einen Schneckenantrieb ein eigener Emulgator eingebracht wird. Das Open Source-Design Fab-Home von Cornell kann Lebensmittel und andere Produkte in beliebiger Form aus fast jedem Material herstellen, das püriert und durch eine Spritze ausgegeben werden kann – von Kuchenteig und Brotteig bis hin zu druckbaren Schnitzel- und Selleriepasten.

Die RepRap-Drucker, um die es später in diesem Buch noch gehen wird, können ebenfalls den als Open Source bereitgestellten Universal Paste Extruder von Richard verwenden, um 3D-gedruckte Muffins, Mais-Chips und sogar Schokolade auszugeben, wie beispielsweise das in Abbildung 4.5 gezeigte Häschen.

Andere Alternativen verwenden FFF (Fused Filament Fabrication, Fertigung aus geschmolzenen Fäden), mit Wachs und Granulaten in Pastenform, wie beispielsweise Zucker, Salz und eine Art Keramikpulver, die auch beim Sintern und bei der Fertigung mit Granulatbindung verwendet werden.



Abbildung 4.5: 3D-gedruckter Schwarz-Weiß-Schokohase, hergestellt mit einem RepRap-3D-Drucker und dem Universal Pasten-Extruder von Richard

## Granulat

Granulate werden beim Sintern, beim Schmelzen und beim additiven Auftrag von Bindeklebern verwendet. Sie können damit Objekte aus den unterschiedlichsten Materialien herstellen, wie beispielsweise aus Glaspartikeln, Kunststoffpulvern, verschiedenen Metallen und Legierungen – aus fast jedem Material, das zu einem feinen Pulver oder Granulat verarbeitet werden kann.

## Kunststoffpulver

Im Handel erhältliche Drucker, wie beispielsweise der Mehrfarben-Drucker ZPrinter, verbinden Kunststoffpulver unter Verwendung eines flüssigen Klebers. Um die resultierenden Objekte weiter zu verfestigen, werden sie für die Nachverarbeitung in der Regel in ein Cyanoacrylat-Harz (»Superkleber«) getaucht, um die Lücken zwischen den Partikeln zu füllen. Ohne diesen Füllstoff aus Harz haben diese Objekte in der Regel nicht die strukturelle Stärke, wie sie andere additiv gefertigte Produkte aufweisen. Die Verwendung von per Strahldruck aufgetragenen Klebern ermöglicht die Mischung von Farben, wie sie bei anderen Formen der Schmelz- oder Sinterfertigung nicht möglich sind. Andere Drucker, wie beispielsweise das in Abbildung 4.6 gezeigte VoxelJet-System, können Materialien wie beispielsweise granulierten Kunststoff und feinen Sand verarbeiten, um Produkte daraus herzustellen.



Abbildung 4.6: Der VoxelJet VX4000, der Granulatpulver unter Verwendung eines Systems zum Auftrag von Binder von oben bindet  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von VoxelJet)

### Zucker und Salz

Gedruckte Lebensmittel, aus denen Kunstobjekte erstellt werden, sind nicht nur auf einfache extrudierte Schokolade begrenzt. Die granulare Bindung von Zucker und Salz bietet eine Feineinstellung der Details, die notwendig ist, um komplexe Strukturen zu erzeugen, wie beispielsweise die in Abbildung 4.7 gezeigte Zuckerskulptur. Obwohl Objekte auch unter Verwendung von Sintern und Schmelzen der Zuckergranulate erstellt werden können, bewirkt die Anwendung von Hitze eine Karamellisierung der meisten Zucker und damit eine Farbumwandlung während des Prozesses.

### Metallpulver

Anfertigungen für die Luftfahrt, den Automobilsektor und den Medizinbereich benötigen ein Material, das sehr viel stärker als Kunststoff ist – häufig werden biokompatible Metalle verwendet, wie beispielsweise Titan, oder Materialien, die sehr hohe Temperaturen aushalten oder die ein hohes Festigkeit-Gewicht-Verhältnis aufweisen, etwa für Rennautos oder Flugzeugkomponenten. Viele Materialien wie etwa Titan oder Wolfram sind bei der herkömmlichen Fertigung schwierig zu verarbeiten, wo ihre hohen Schmelzpunkte und andere Faktoren eine einfache Integration unter Verwendung traditioneller Fertigungstechniken verhindern.





*Abbildung 4.7: 3D-Druck unter Verwendung gebundener Zuckergranulate  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von The Sugar Lab)*

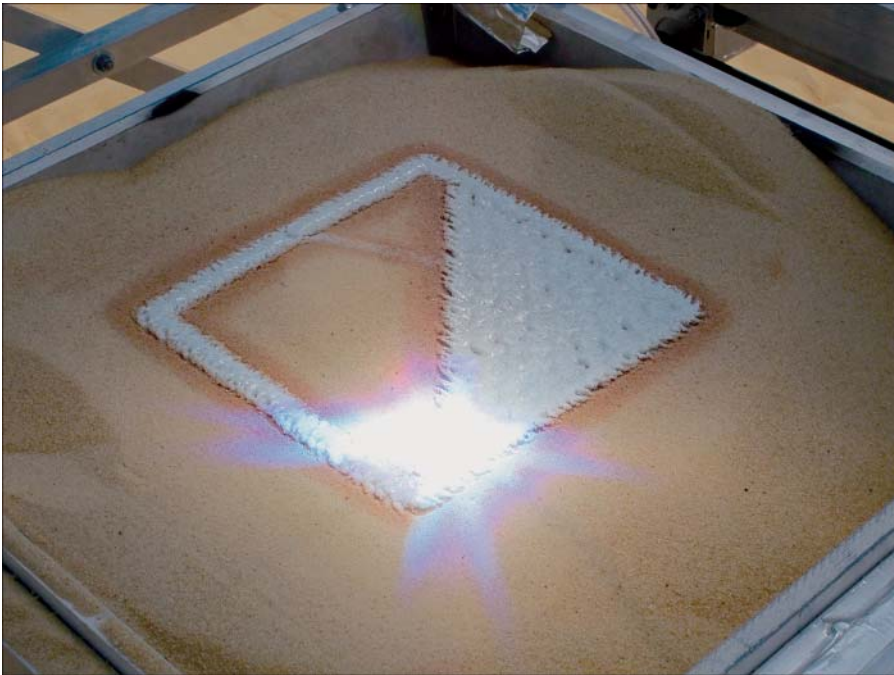


*Abbildung 4.8: Feine Details an einem Titan-Gelenkimplantat unter Verwendung von  
Metallpulvern und einem EOS-Metall-Sinter-System  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von Within Technologies)*

Durch Sinter- und Schmelztechniken per Laser- oder Elektronenstrahl können sehr hochauflösende Details erzielt werden, selbst wenn die Materialien nicht gut legieren oder bei übereinstimmenden Temperaturen schmelzen. Abbildung 4.8 zeigt eine Granulatbindung von Titanpartikeln, erzeugt durch Sintern, für ein spezifisch angefertigtes medizinisches Implantat.

## **Sand und natürliche Granulate**

Quarz und andere Mineralien können genutzt werden, um Gegenstände über additive Fertigungstechniken herzustellen, die Granulatbindung, Sintern und Schmelzen der individuellen Granulate in eine natürliche Aggregatform von Glas nutzen. Forscher wie Markus Kayser vom MIT untersuchen derzeit die Verwendung natürlich vorkommender Sande, die nur mit Sonnenlicht verschmolzen werden, um haltbare Objekte und Strukturen in einigen der ärmsten Teile der Erde zu erstellen, wo Baumaterial teuer und schwer erhältlich ist. Abbildung 4.9 zeigt seinen Solar Sinter im Betrieb, wie er ein grobes, festes Naturglasobjekt aus Sand direkt aus der ägyptischen Wüste ohne jede weitere Verarbeitung erzeugt.

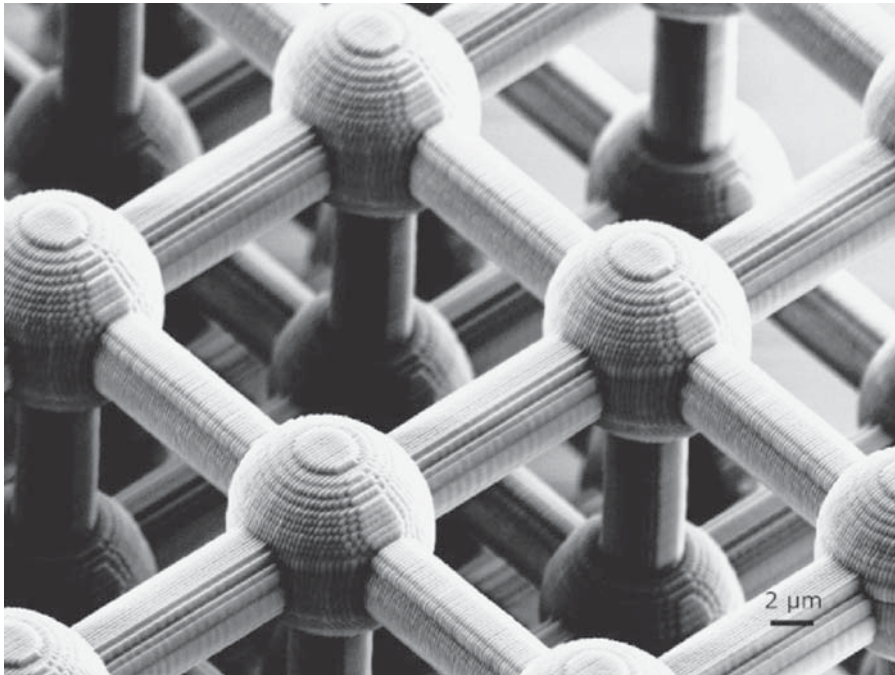


*Abbildung 4.9: Laser-Sintern von granulearem Sand erzeugt eine grobe Art von Naturglas.  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von Markus Kayser)*

## **Lichtgehärtete Harze**

Flüssige Fotopolymer-Harze, die in Stereolithografie-Systemen (SLA) verwendet werden, sind so eng an ihre jeweiligen Anwendungen gekoppelt, dass sie in der Regel direkt vom Hersteller verkauft werden, um Kompatibilität zu gewährleisten. Die Durchsichtigkeit des Harzes bestimmt, wie viel Licht erforderlich ist, um eine Schicht des gedruckten Objekts zu härten – und wie tief jede Schicht in den Flüssigkeitspool eintaucht. Die Frequenz des vom Laser oder DLP-Projektor ausgegebenen Lichts bestimmt die Absorption durch das Harz.

In hochpräzisen Multi-Photonen-Lithografie-Systemen wie dem NanoScribe (mit dem das in Abbildung 4.10 gezeigte mikroskopische Gitter erstellt wurde) härtet die Interaktion zwischen mehreren Lichtquellen die einzelnen Punkte innerhalb des Bauvolumens.



*Abbildung 4.10: Photonen-Kristallgitter, das unter Verwendung der Zwei-Photonen-Lithografie erzeugt wurde, fotografiert durch ein Mikroskop  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von NanoScribe)*

## **Bioprinting**

Von allen Typen der additiven Fertigung erhält derzeit die Verwendung lebender Zellen beim Drucken die meiste Aufmerksamkeit. Der Bereich des Bioprintings gewinnt täglich an Bedeutung und schafft womöglich eines Tages perfekte Steaks, ohne dass methan-produzierende Futterplätze notwendig sind, Lederbekleidung, ohne dass der ursprüngliche Besitzer dieser Haut dafür getötet werden muss, oder Ersatzteile – bis hin zu ganzen Organen – aus den eigenen Zellen eines Menschen, ohne dass dafür ein Organspender erforderlich ist. Es gibt keine generischen Materialien für das Bioprinting, und auch keine Standards für ihre Verwendung – weil diese Technologie das Potenzial bietet, die eigenen Zellen eines Organismus als Bausteine für komplexere Gewebe und Organe zu nutzen.



### ***PolyJet-Materialien***

Neben den Flüssigkeitspools aus Fotopolymer-Harzen, die von der Unter- oder Oberseite des Pools her durch externe Lichtquellen gehärtet werden, hat Objet Corporation eine völlig neue Technik erschaffen: Strahlapplikatoren tragen die Harze auf und ein UV-Licht härtet die aufgesprühte Schicht sofort in eine feste Form.

Dieser PolyJet-Auftrag kann unterschiedliche Materialien so mischen, wie herkömmliche 2D-Drucker Tintenfarben mischen – aber statt (beispielsweise) blau und gelb zu mischen, um grün zu erhalten, kann der PolyJet-Drucker jetzt ein flexibles Material und ein festes Material mischen, um Objekte unterschiedlicher Stärke und Flexibilität zu erzeugen. Komplexe Bereiche mit größerer Stärke können in flexiblere Bereiche integriert werden, und anschließend können sie gemeinsam als ein Objekt ausgedruckt werden. Auf diese Weise erzeugte Objekte brauchen nicht mit Klebern oder anderen herkömmlichen Techniken für die Montage nachbearbeitet zu werden.

PolyJet-Drucker gestatten es derzeit, die umfangreichste Palette potenzieller Materialien in einem einzigen Druckvorgang zu verwenden – derzeit gibt es über 104 verschiedene Optionen. Durch die Mischung unterschiedlicher Materialien kann Objet ein vollständiges Modellschiff in einer durchsichtigen Flasche herstellen, oder ein medizinisches Modell eines transparenten Körpers, wobei nur die wichtigen Details als eingefärbte Objekte dargestellt werden.

### ***Bioprinting für Lebensmittel und tierische Produkte***

Lebensmittel sind von der grundlegenden Fähigkeit abhängig, eine Tierpopulation zu erhalten und Futtermittel zu produzieren. Insbesondere für die Produktion von Proteinen aus Fleisch sind erhebliche Ressourcen erforderlich – Futtergetreide, frisches Wasser und Land, ebenso wie das Management von Nebenprodukten wie Methan und tierischem Abfall in den Viehhaltungsbetrieben. Da es auf der Welt immer mehr Menschen zu ernähren gilt und Trinkwasser und verfügbares Land immer knapper werden, könnte die Möglichkeit, lebendes Gewebe wie Fleisch zu erzeugen, ohne dass Tiere dafür benötigt werden, sowohl wirtschaftlich als auch ökologisch – und für manche Menschen auch aus ethischen Gesichtspunkten – große Bedeutung bekommen.

Aktuelle Versuche, Muskelgewebe unter Verwendung von 3D-gedruckten Gelatinestrukturen und lebenden Zellen zu züchten, sind noch nicht ausgereift genug, um ein erkennbares Steak (oder selbst einen annehmbaren Hamburger) zu produzieren, aber die Forschung ist noch ganz am Anfang. Das Unternehmen Modern Meadow versucht, Bioprinting-Alternativen zu entwickeln, für die keine Tiere mehr getötet werden müssen, um Fleisch und Leder zu produzieren. Es setzt dazu additive Fertigungstechniken ein.

Leder ist ein weiteres Material, das aktuell untersucht wird, weil es auf der ganzen Welt die Bestrebung gibt, die Nutzung von Tieren einzugrenzen, deren Pelz, Leder und andere Materialien gewonnen werden, um sie für die Bekleidungsindustrie zu nutzen. Organisationen

wie PETA zeugen von einem zunehmenden Interesse an Alternativen, aber viele Teile der Welt bleiben zu arm und können sich keine kostspieligen Alternativen zur herkömmlichen Fertigung von Schuhen, Seilen oder Viehställen leisten. Wenn das Bioprinting für Leder möglich wird, könnten die Eigenschaften dieses Materials auf zahlreiche Anwendungen ausgeweitet werden, ohne dass ein einziges Tier sterben müsste, während gleichzeitig ein Großteil der Kosten und des Abfalls der Landwirtschaft wegfallen würden.

### *Ersatz für Gewebe und Organe*

Biologische Gewebe können für sehr viel mehr als nur für Nahrungsmittel und Kleidung verwendet werden – insbesondere könnten wir damit unseren eigenen Körper reparieren oder verbessern. Anders als Spendergewebe werden über das Bioprinting erzeugte Alternativen aus unseren eigenen Zellen hergestellt, Medikamente gegen die Abstoßung und Wartelisten für übereinstimmende Spenderorgane werden also der Vergangenheit angehören. Frühe Erfolge bei Geweben und Organen aus dem Bioprinting wurden beispielsweise für Blutgefäße, Luftröhren und sogar Blasen erzielt, weil ihre Zellstruktur sehr einfach ist.

Organovo hat vor Kurzem Fortschritte beim 3D-Druck einer Leber veröffentlicht, wobei mehrere Gewebetypen zu einer komplexen Struktur zusammengesetzt werden, die bald schon zu einem 3D-Druck-Ersatz für das wichtigste Filterorgan des Körpers führen wird. Auch Fortschritte im Bereich von Herz- und Lungengewebe aus dem 3D-Drucker werden uns Techniken an die Hand geben, allgemeine Schwächen zu beheben, die mit dem Alter kommen. 3D-gedruckte biokompatible Implantate werden bereits für kosmetische und rekonstruierende Zwecke getestet.

Forscher beschäftigen sich mit neuen Operationstechniken, die arthroskopische Verfahren beinhalten, bei denen Organe in unserem Körper ersetzt oder repariert werden können, ohne dass gefährliche Operationen am offenen Körper erforderlich sind.

Es gibt natürlich auch potenziell negative Verwendungszwecke derselben Techniken. Beispielsweise könnte einem Sportler zusätzliches Muskelgewebe implantiert werden, oder ein besseres Bindegewebe, um seine Leistungen zu erhöhen. Die Fähigkeit, zu einem Schönheitschirurgen mit Bioprinting-Angebot zu gehen, um sich das Gesicht des aktuellen Top-Models machen zu lassen, könnte zu Copyright-Prozessen führen, die man sich heute noch gar nicht vorstellen kann.

Natürlich wird es Zeit brauchen, bis sich unsere Kultur und unsere Rechtssysteme an diese Technologien angepasst haben, doch eines Tages werden die Techniken so weit sein, dass sie das menschliche Leben erweitern und verlängern, unser Aussehen und unsere Größe ändern oder völlig neue Funktionen in unseren Körpern realisieren können. Die ersten Schritte zu all diesen Dingen werden heute bereits in der Forschung untersucht.

### *Alternative Materialien*

Die additive Fertigung findet in so vielen Bereichen der Fertigung und Produktion Anwendung, dass mit der Abkehr von den traditionellen Fertigungstechniken sehr schnell auch Alternativen zu den herkömmlichen Materialien verfügbar sein werden.

### Recycelte Materialien

Wenn es 3D-gedruckte Gebäude in Form extrudierter Betonstrukturen gibt, werden effizientere Ansätze für den Bau möglich. Elemente wie Stromleitungen und Installationsrohre können direkt beim Druck in die Struktur eingefügt werden. Schnelle Montagesysteme können neben einem neuen Gebäude Komponenten herstellen und sie aufeinander montieren, während der 3D-Drucker eine Schicht Beton nach der anderen erzeugt, bereits mit den richtigen Hohlräumen für die anderen Komponenten (siehe Abbildung 4.11). Neue Wege zur Verwendung recycelter Materialien sind nur die logische Fortsetzung dieses Prozesses.



*Abbildung 4.11: Abschnitt einer gerippten Betonwand aus dem 3D-Drucker, mit Hohlräumen für elektrische Leitungen oder Installationsrohre (Bild mit freundlicher Genehmigung von Contour Crafting)*

Neben der Entwicklung neuer Materialien kann die additive Fertigung auch vorhandene Materialien effizienter nutzen, durch

- ✓ die Reduzierung des benötigten neuen Materials
- ✓ durch die Reduzierung von Abfall
- ✓ durch Wiederverwendung, Recycling und neue Nutzung von bereits verwendeten Materialien

Der Künstler Dirk Vander Kooij beispielsweise hat den Kunststoff von alten Kühlschränken verwendet, um die extrudierten Möbel seiner Serie »Endless« zu schaffen. Andere Erfinder arbeiten an Geräten, die die Endverbraucher verwenden können, um neue 3D-Druckfäden aus billigen Pellets oder sogar aus ihren alten, nicht geglückten Drucken und Abfall-Thermoplastmaterialien zu erzeugen.

Die additive Fertigung bietet also die Gelegenheit, bei der Herstellung neuer Materialien und Produkte in mehrfacher Hinsicht wirklichen Umweltschutz zu betreiben:

- ✓ Für den anfänglichen Herstellungsprozess wird weniger Material benötigt, weil die Bearbeitung nach der Herstellung wegfällt und kein Materialabfall mehr entsteht.
- ✓ Komplexe Strukturen mit innen liegenden Hohlräumen können effizient erstellt werden, was bei der herkömmlichen Formung oder bei der Spritzgussformung nicht möglich war.
- ✓ Für den 3D-Druck können bereits verwendete und recycelte Materialien verwendet werden.

Das führt zu langfristiger Nachhaltigkeit angesichts abnehmender Ressourcen, da das Ölfördermaximum ab dem Jahr 2020 überschritten sein wird.

In der Forschung gibt es erste Erfolge bei der Verwendung von recyceltem Papier, Glas und pulverisiertem Beton, um neue Materialien für die additive Fertigung herzustellen. Darüber hinaus werden immer umweltfreundlichere Materialien entwickelt, wie beispielsweise das vollständig biologisch abbaubare PLA-Thermoplast, das auf Basis von Pflanzenzucker erzeugt wird. Mit einem leistungsfähigeren Bioprinting werden neue Nahrungsmittelarten und andere tierische Produkte möglich, ohne dass Tiere getötet werden müssen, und ohne riesige Viehherden mit Trinkwasser und wertvollem Getreide versorgen zu müssen, das für die zunehmende Bevölkerung benötigt wird.

### *Nahrungsmittelhaltbarkeit*

Die NASA fördert derzeit die Entwicklung eines 3D-Druckers, der Nahrungsmittel wie beispielsweise eine Pizza aus pulverförmigen Ausgangsmaterialien erstellen kann, die nur unter Verwendung von Wasser in Pasten umgewandelt werden können. Diese Pasten könnten dann Schicht für Schicht extrudiert und sogar durch die beheizte Aufbauplatte eines speziellen 3D-Druckers gekocht werden. Verwendet werden soll ein solcher Drucker bei langen Exkursionen zum Mond oder zu anderen Planeten im Sonnensystem. Die Haltbarkeit solcher pulverisierter Nahrungsmittel soll 30 Jahre und mehr betragen. Es könnten also auch Nahrungsmittellager geschaffen werden, die nach Bedarf verteilt werden können, zum Beispiel auch vor schweren Stürmen.

## *Versorgung von Menschen*

Nach großen Naturkatastrophen könnte eine mobile additive Fertigungseinrichtung Lebensmittel und Unterkünfte bereitstellen, indem beschädigte Bauten und Schutt gesammelt und zu dem Material recycelt werden, das nach einer Flut, einem Erdbeben oder einem Tsunami gebraucht wird. Verletzungen können mithilfe von 3D-Biodruckern geheilt werden, die basierend auf lebenden Zellen der Verletzten kompatibles Gewebe erzeugen – ohne dass es zu Problemen mit nicht geeignetem Gewebe oder einer potenziellen Abstoßungsreaktion kommt.

Im täglichen Einsatz werden 3D-Drucker in der Lage sein, Medikamente genau auf die Bedürfnisse des einzelnen Patienten abzustimmen. Statt zehn Tage lang täglich zwei Tabletten des Medikaments X einzunehmen, und dann eine Tablette des Medikaments X und eine des Medikaments Y, könnte die Einnahme vereinfacht werden: Spezialisierte 3D-Drucker werden bald in der Lage sein, die täglichen Medikamente in der kleinstmöglichen Anzahl an Tabletten bereitzustellen, mit der täglich erforderlichen Dosierung und den richtigen Wirkstoffanteilen, sodass jeder einzelne Patient individuell und präzise behandelt werden kann.

# Quellen für 3D-Druck-Objekte

# 5

## *In diesem Kapitel*

- ▶ Objekt-Verzeichnisse erkunden
- ▶ Entwürfe auf dem Computer erstellen
- ▶ Objekte einscannen
- ▶ Strukturen aus Fotos übernehmen
- ▶ Modelle für den Druck aufbereiten

**H**eute findet man immer mehr 3D-Drucker in Unternehmen, Schulen, Bibliotheken und im privaten Umfeld. Online-Services wie Shapeways, Ponoko und iMaterialise können aus 3D-Modellen Festkörper erstellen, selbst wenn Sie keinen eigenen Drucker haben. Diese 3D-Modelle entstehen jedoch nicht von ganz alleine – sie müssen erstellt werden. Nachdem sie erstellt wurden, können sie mit der ganzen Welt geteilt werden, so einfach wie ein Lied im MP3-Format oder ein Foto auf einer Fotosharing-Site.

In diesem Kapitel zeigen wir mehrere Methoden, 3D-Modelle zu erstellen, die für den Ausdruck oder die Weitergabe an Dritte geeignet sind. Beachten Sie jedoch, dass nicht alle Objektentwürfe ohne die Genehmigung des ursprünglichen Designers erfasst, geteilt oder anderweitig reproduziert werden dürfen. Bevor Sie ein Objekt erstellen oder ein eigenes Design verkaufen, sollten Sie wirklich sichergehen, dass es Ihnen gehört. In Kapitel 11 geht es um die üblichen Lizenzierungsmodelle in der 3D-Druck-Community, aber wir wollen gesondert darauf hinweisen, dass Sie kreative Arbeiten von anderen nur nutzen dürfen, wenn Ihnen dies genehmigt wurde. Es ist ganz einfach, Designs mit wenigen diesbezüglichen Einschränkungen zu finden – beispielsweise Designs, deren Entwickler nur fordern, dass sie als Entwickler genannt werden –, sodass Sie unter einer Fülle von Modellen auswählen können, um mit dem 3D-Druck zu beginnen!

## *Objektverzeichnisse*

Ein virtuelles 3D-Objektmodell wird unter Verwendung von Standard-Dateiformaten gespeichert, zum Beispiel als STL- oder OBJ-Datei. Einzelne 3D-Modelldateien können per E-Mail versendet, in einem Verzeichnis gespeichert oder über einen beliebigen Service geteilt werden, der ASCII-Daten verarbeitet. Um die softwarespezifischen Dateitypen zu öffnen und das virtuelle Modell zu bearbeiten, brauchen Sie jedoch die entsprechende Software. Andere spezifische Dateiformate sind beispielsweise SKP für SketchUp, SLDPRPT für SolidWorks, STP für 3DStudioMax, BLEND für Blender und DXF für Autodesk-Produkte, mit denen ebenfalls 3D-Modelle gespeichert und online geteilt werden können.

## Verzeichnisse von Anbietern

Die ersten Anlaufstellen für 3D-druckbare Designs, die die meisten Anwender entdecken, sind die Online-Verzeichnisse, die die Anbieter von 3D-Druckern bereitstellen. Wenn beispielsweise 3D Systems einen neuen Cubify 3D-Drucker verkauft, wird das Unternehmen dafür sorgen, dass der Käufer Beispielmuster herunterladen kann, um seinen neuen Drucker zu testen!

In diesen Verzeichnissen finden Sie kostenlose Datei-Downloads für die unterschiedlichsten 3D-druckbaren Objekte – Gehäuse für Ihr iPhone, Knöpfe, die Sie an Ihr Lieblingshemd nähen können, oder Dekomaterial für Ihre nächste Halloween-Party. Die Anbieter stellen kostenlose Designs bereit, die Sie herunterladen, mit unterschiedlichen Programmen (die wir später in diesem Kapitel ansprechen werden) bearbeiten und als Festkörper ausdrucken können.



Auf den Seiten von [Cubify.com](http://Cubify.com) können Designer außerdem 3D-Modelle hochladen, die Kunden gegen eine Gebühr herunterladen können. Hier ist ein neuer Markt entstanden, der komplett auf virtuellen Objektdesigns beruht, für die man kein Lager, keinen Lagerplatz und keinen Versand an den Kunden benötigt.

Andere Anbieter pflegen 3D-Druck-Verzeichnisse, um ihren Kunden Teile für ihre Produkte bereitzustellen, wodurch Kosten reduziert werden und das endgültige Design durch den Kunden personalisiert werden kann. Der Cartesian MendelMax RepRap-Kit, den wir später im Buch vorstellen werden, ist ein gutes Beispiel für diesen Ansatz: MendelMax stellt Modelle für die Klammern zur Montage von Endschaltern bereit (siehe Abbildung 5.1), indem es sie als Dateien in einem elektronischen Verzeichnis veröffentlicht. Die Benutzer können die Dateien herunterladen und die eigentlichen Objekte später selbst erzeugen.

Auf diese Weise können die Anbieter auch Designs bereitstellen, um ihre Produkte zu erweitern oder zu personalisieren. Wir haben in Kapitel 1 bereits erwähnt, dass Nokia sein 3D-druckbares Telefongehäuse auf diese Weise veröffentlicht hat. Der Anbieter kann also die Attraktivität einer Produktlinie erhöhen, indem er den Kunden gestattet, ihre eigenen Gehäuse zu entwerfen oder Designs von anderen zu kaufen, um sie dann zuhause oder über einen Online-Service auszudrucken.

Mithilfe solcher Verzeichnisse können dem Kunden plötzliche Abänderungen bereitgestellt werden, ohne dass ein neuer Bausatz dafür zusammengestellt werden muss. Stattdessen wird den Kunden einfach mitgeteilt, dass es ein Upgrade gibt, und wo es zum Download zur Verfügung steht. Wenn es in ein paar Jahren einen Rückruf für Autoteile gibt, werden Sie dazu einfach in die Werkstatt fahren, und Ihr Händler kann das ordnungsgemäß abgeänderte Teil für Ihr Fahrzeug aus dem Verzeichnis des Herstellers herunterladen, ausdrucken und einbauen. Es wird nicht mehr notwendig sein, eine Vielzahl unterschiedlicher Teile auf Lager zu haben, um für jedes von dem Rückruf betroffene Fahrzeug das richtige Teil bereitstellen zu können.

Einige Anbieter stellen Kunden sogar Designs bereit, um ihnen bei der Reparatur von Produkten zu helfen. Auf diese Weise können die Anbieter bisweilen kostspielige Produkt-rückrufe vermeiden. Beispielsweise könnte ein Kinderwagenhersteller seinen Kunden ein ausdruckbares Modell für ein kleines Ersatzteil in seinem eigenen Design-Verzeichnis für





*Abbildung 5.1: Vier Klammern für die Elektronik, die für den Zusammenbau des MendelMax 2.0 RepRap-3D-Druckers benötigt werden*

Teile bereitstellen. Die Kunden könnten unter Verwendung eines Metallfertigungssystems das Ersatzteil bei ihrem 3D-Druckcenter vor Ort ausdrucken, und die Reparatur wäre in wenigen Stunden erledigt, statt wochenlang auf ein winziges Ersatzteil warten zu müssen, das per Post zu ihnen nach Hause geschickt wird. Andere Teile könnten sogar so entwickelt werden, dass sie aus Kunststoff auf 3D-Druckern zuhause ausgedruckt werden können, so wie Nokia das mit seinem Handy-Gehäuse bereits macht.

### **Community-Verzeichnisse**

Eine weitere Quelle für 3D-druckbare Objekte sind die zahlreichen Community-Verzeichnisse im Internet. Die Benutzer dieser Verzeichnisse laden ihre Modelle aus den unterschiedlichsten Gründen hoch – beispielsweise zu Lehrzwecken, als Verwirklichung ihres künstlerischen Ausdrucks, oder auch, um funktionale Teile zu verteilen, wie etwa die Komponenten, die Sie brauchen, um einen neuen 3D-Drucker zu bauen. Eng gekoppelt mit dem sogenannten »Maker Movement«, unterstützen viele dieser Verzeichnisse Open Source-Designs und Modelle mit freigegebener Lizenzierung, wo die Spuren der Abwandlungen von Objektdesigns bis zum stolzen Originalentwickler zurückverfolgt werden können.

Viele der Modelle, die wir als Beispiele für den 3D-Druck verwenden, stammen aus Community-Verzeichnissen wie Thingiverse, einem Open Source-Design-Verzeichnis von den Mitbegründern des 3D-Drucker-Unternehmens MakerBot – Bre Pettis und Zack Smith. Abbildung 5.2 zeigt einige Objektdesigns aus Thingiverse, wo Hunderttausende Modelle zum Herunterladen bereitstehen, sowohl im Original, als auch Abwandlungen von Originalen. Diese Objektmodelle sind in Kategorien eingeteilt, beispielsweise Kunst, Mode und 3D-Drucker, aber Sie können auch ganz leicht einen ganzen Nachmittag damit verbringen, die Listen möglicher Designs zu durchblättern, die Sie erstellen und Ihren Freunden zeigen können.

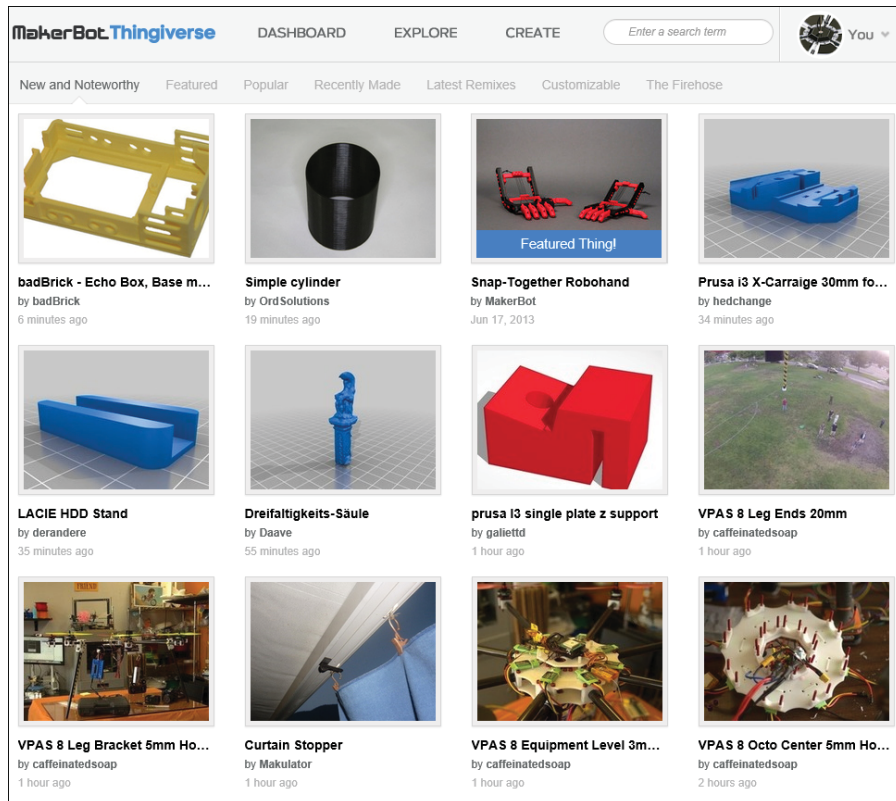


Abbildung 5.2: Ein Beispiel für das Verzeichnis der Thingiverse-Community von Makerbot

Viele Upgrades der im Handel erhältlichen 3D-Drucker werden über Verzeichnisse wie Thingiverse verteilt, und Sie können sogar Designs ganzer 3D-Drucker im Internet finden, wenn ihre Erschaffer beschlossen haben, sie als Open Source zu veröffentlichen. Die 3D-Drucker-Kits, die wir später in diesem Buch beschreiben werden (in Teil V, wo es um den Bau eines RepRap-Druckers geht), können ebenfalls unter Verwendung heruntergeladener 3D-druckbarer Objektmodelle und im Handel erhältlicher Komponenten aus den Elektronik- und Hardware-Geschäften vor Ort gebaut werden. Dank dieser Kits ist es nicht mehr notwendig, kompatible Komponenten oder Materialien zu suchen, die Sie möglicherweise

selbst zuschneiden müssen. Kommerzielle Verzeichnisse sind ausgezeichnet, wenn man den ersten 3D-Drucker schnell aufbauen und damit drucken will, aber für Eigenbausysteme sparen Kits die Zeit, die man braucht, um unübliche Teile zu finden, wie beispielsweise Zahnriemen und Schrittmotoren.

## Design auf dem Computer

Bis vor ein paar Jahren brauchte man für den Entwurf von 3D-Modellen eine *CAD-Software* (Computer-aided Drafting, computergestützter Entwurf), wie beispielsweise Autodesk Revit (siehe Abbildung 5.3). Und jahrelang konnten sich die meisten Leute kein CAD leisten, außer ein paar Spezialisten.



Abbildung 5.3: CAD-Design in Autodesk Revit

Durch additive Fertigung können komplexe innere Strukturen realisiert werden statt nur einfache Vollblock-Komponenten. Dies ist eine maßgebliche Verbesserung gegenüber herkömmlichen CAD-Tools, die nicht immer Modelle erzeugen können, die mit den Fähigkeiten von 3D-Druckern konkurrieren können. In bestimmten Bereichen gibt es heute völlig neue Tools. Beispielsweise müssen medizinische Implantate weitgehend angepasst werden, sodass sie zu dem Knochenaufbau eines Patienten passen, während gleichzeitig komplexe Gitter und andere Formen von flexiblen Modellen möglich sind. (Abbildung 5.4 zeigt ein komplexes Strukturgitter, angewendet auf eine anfänglich hohle Kugel mit abgeschnittenen Seiten.)

Neben der professionellen und spezialisierten CAD-Software, für die umfangreiche Schulungen und Praxiserfahrung erforderlich sind, um sie sinnvoll einsetzen zu können, werden seit einiger Zeit auch benutzerfreundlichere und erschwinglichere Alternativen für Privatanwender entwickelt. Unter anderem handelt es sich dabei um das SketchUp-Paket, das ursprünglich von Google entwickelt wurde, Blender und zahlreiche andere Anwendungen, die gegen geringe Gebühr oder kostenlos erhältlich sind. Lehrer an Schulen, die am SOLID Learning-Programm teilnehmen, nutzen häufig TinkerCAD (siehe Abbildung 5.5), weil es kostenlos ist, kein Client

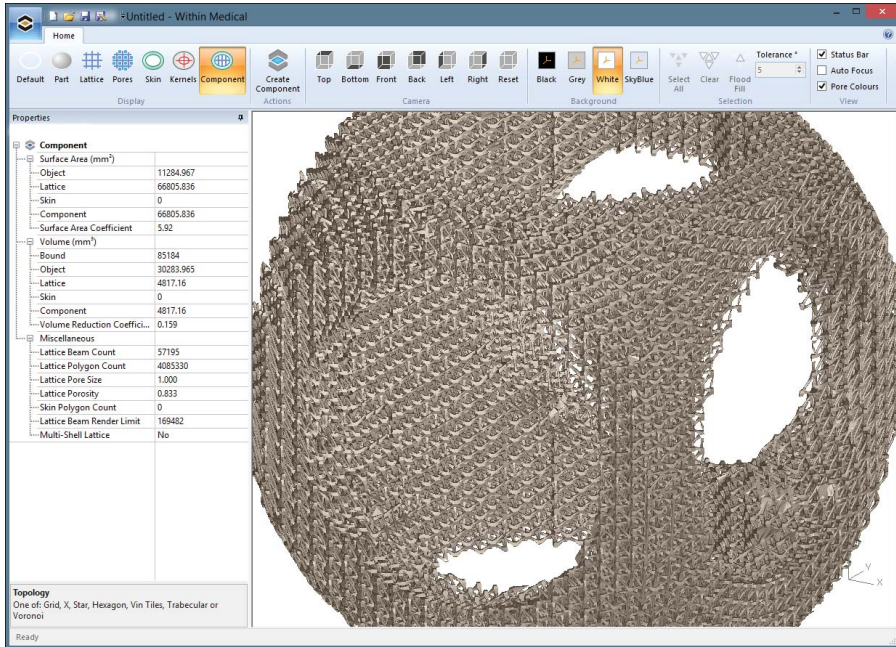


Abbildung 5.4: Ein komplexes Gitterobjekt, das mit der Software Within Medical erstellt wurde

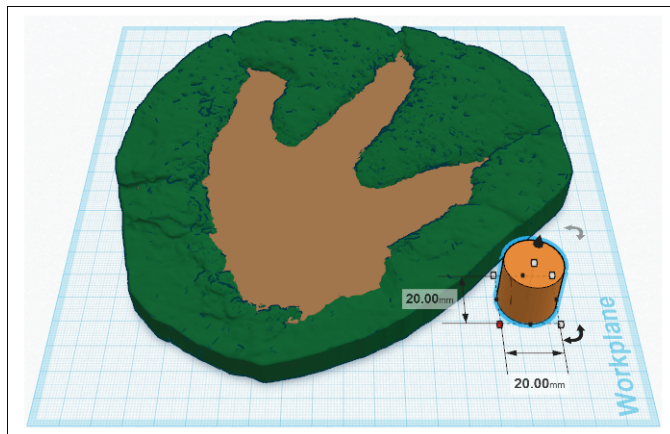


Abbildung 5.5: TinkerCAD wird verwendet, um eine Form für gescannte Dinosaurier-Fährten vom Ausgrabungsort Glen Rose für den 3D-Druck vorzubereiten.  
(Scan einer Dinosaurier-Fährte von Dr. Luis Jacobs)



auf dem Computer installiert werden muss und weil es eine einfache und leicht verständliche Benutzeroberfläche aufweist.

Neben computergestützten Design-Anwendungen hat Autodesk auch mehrere kostenlose Optionen für die heute so beliebten Tablets veröffentlicht. Sie basieren auf einer cloudbasierten Verarbeitung, statt die Berechnungen direkt im Tablet durchzuführen – auf diese Weise erzielen Sie hervorragende Ergebnisse innerhalb kürzester Zeit. Abbildung 5.6 zeigt die CAD-ähnliche Benutzeroberfläche des Programms 123D Design.

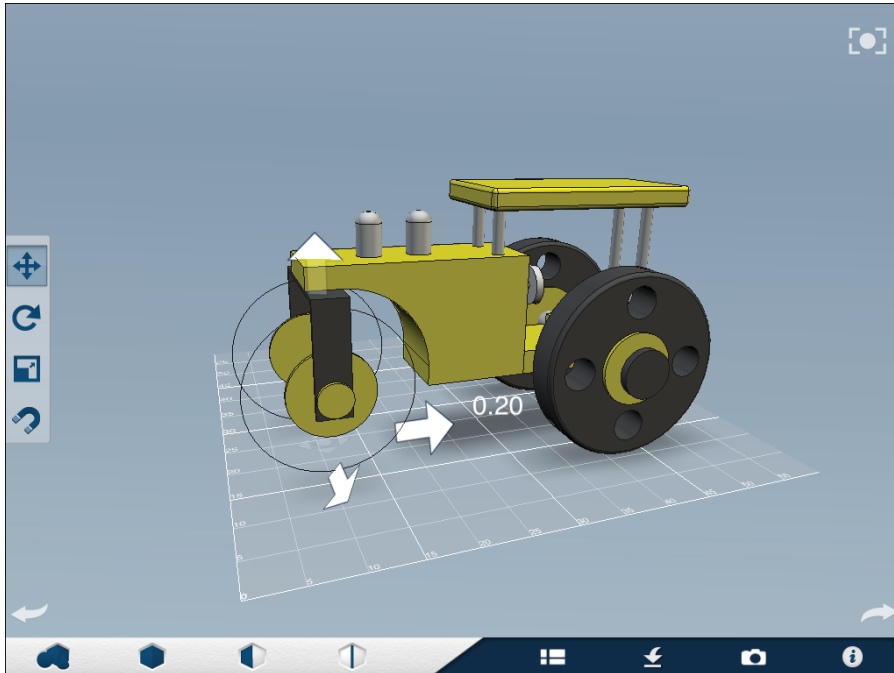


Abbildung 5.6: Bearbeitung eines 3D-Modells in der Anwendung 123D Design für Tablets

Nicht alle Programme für die 3D-Modellierung benötigen eine strenge Bemaßung und harte Kanten, weil die additive Fertigung eine sehr viel flexiblere Bauumgebung unterstützt, als es die herkömmliche Fertigung den privaten Designern bieten konnte. Eine weitere kostenlose Anwendung für Tablets von Autodesk ist 123D Creature, das bei Kindern sehr beliebt ist, weil sie damit auf einer einfachen Drag&Drop-Oberfläche 3D-druckbare Monster schaffen können (siehe Abbildung 5.7).

Viele Programme für 3D-Design und -Modellierung können Dateien in üblichen Dateiformaten für den 3D-Druck exportieren, zum Beispiel als STL-Dateien, die für unsere RepRap-Beispiele verwendet werden. Designer erstellen damit ihre bevorzugten Tools für den Aufbau komplexer und wunderbarer Arbeiten für den Druck, die Weitergabe oder den Verkauf. Der 3D-Druck



Abbildung 5.7: Modell eines 3D-Monsters in der Anwendung 123D Creature für Tablets

gestattet es einzelnen Designern bereits, ihre Kunstwerke und andere Designs zu verkaufen, ohne die Einschränkungen im Hinblick auf Design und Fertigung, wie sie bei traditionellen Verfahren vorkommen können.

### Objekte einscannen

Bereits existierende Objekte können auch in den Computer eingescannt werden, um sie zu verändern oder um sie mithilfe eines 3D-Druckers nachzubilden. Das ist besonders praktisch bei Kunstwerken oder anderen speziellen Formen, die nicht ganz einfach als ComputermodeLL nachzubilden sind. Die Dinosaurier-Fährte aus Glen Rose (siehe Abbildung 5.5) beispielsweise stammt von einem Laser-Scan des fossilen Originalabdrucks, der verwendet wurde, um eine elektronische Kopie der Fährte anzufertigen (siehe Abbildung 5.8), die weitergegeben werden kann, ohne das Original zu gefährden.

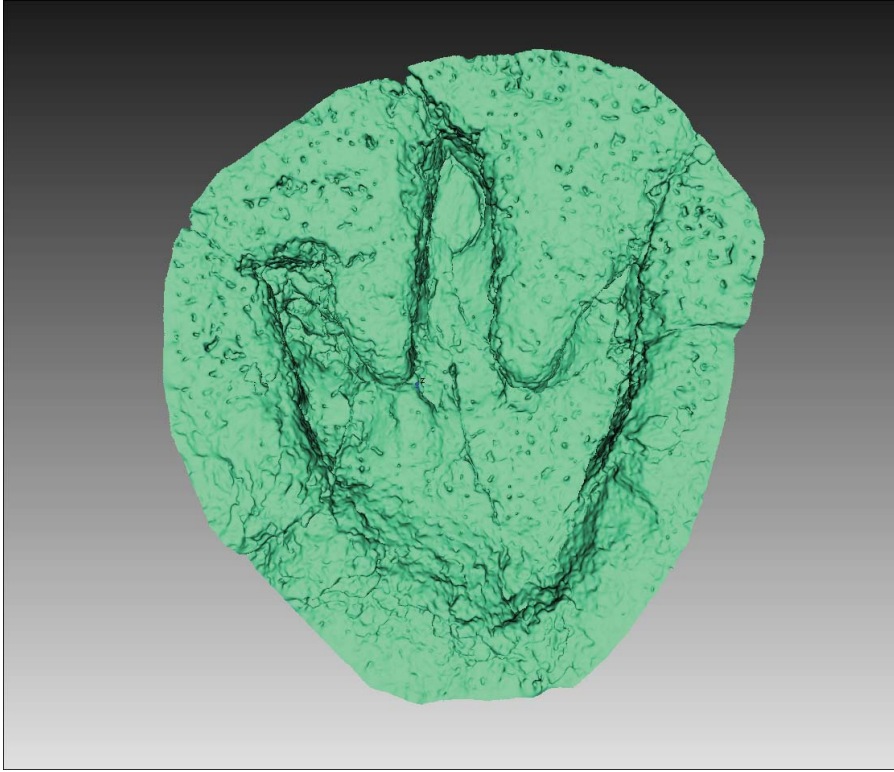


Abbildung 5.8: Eine gescannte virtuelle Kopie der Dinosaurier-Fährte von Glen Rose

Beim optischen Scannen wird nur die äußere Form eines Objekts erfasst. Mithilfe der Ultraschall-Bildgebung oder CT-Scan-Daten können jedoch auch Modelle des internen Aufbaus erstellt werden. Vor kurzem haben Forscher ein Modell des ersten freiliegenden kompletten Skeletts eines lebenden Tieres erzeugt. Dazu haben sie die Knochenstruktur aus einem CT-Scan des betrachteten Tiers auf einem 3D-Drucker ausgedruckt. Vergleichbare Daten werden verwendet, um Gesichtszüge von Mumien in Ägypten zu rekonstruieren oder die jüngst entdeckten Überreste von König Richard III. Mithilfe von CT-Scans und einem Stereolithografie-System konnten die Forscher an der Universität von Dundee den Schädel von König Richard III. als Festkörper ausdrucken und damit herausfinden, wie dieser Herrscher, der schon seit Langem tot ist, zu seinen Lebzeiten ausgesehen hat.

Frühe 3D-Erfassungssysteme verwendeten einen Sensor, der das gedruckte Objekt an vielen verschiedenen Positionen abtastete und damit eine »Punktwolke« für den Umriss des Objekts schuf, um seine grundlegende Geometrie zu definieren. Je mehr feinere Punkte der Scanner zwischen den ursprünglichen Marken maß, desto feiner konnte das Objekt mit Details gefüllt werden. In der Maschinenanalyse und bei anderen feststehenden Umgebungen werden diese Systeme immer noch eingesetzt. Neuere Scanner verwenden eine Beleuchtung durch Laser oder *strukturiertes Licht* – Projektionen, die den Abstand von der Kamera zu verschiedenen



Teilen eines Objekts messen, sodass keine Gefahr besteht, dass das betrachtete Objekt durch die Kontaktpunkte des Scanners beschädigt wird. Abbildung 5.9 ist ein Beispiel für einen eigenständigen Hand-Scanner von Creaform, mit dem ein menschliches Gesicht gescannt werden kann. In Kombination mit der Software auf einem Computer kann dieser Scanner, der mit strukturiertem Licht arbeitet, durch wiederholte Messungen der Oberflächenstruktur eines Objekts ein 3D-Modell erstellen, indem der Scanner einfach über dem betreffenden Objekt geschwenkt wird.



*Abbildung 5.9: Der Handscanner Go!Scan von Creaform verwendet strukturiertes Licht, um ein menschliches Gesicht aufzunehmen.*

Optische Scanner haben Probleme, stark reflektierende Oberflächen zu scannen, oder Objekte, die wenige Details aufweisen. Während eine gespiegelte Oberfläche so erscheint, als wäre der Pfad zu dem, was gespiegelt wird, einfach entsprechend länger, würde eine große Kugel für den Scanner von einem Punkt zum anderen identisch erscheinen. Die Software hätte Probleme, die verschiedenen Winkel zu einem Gesamtmodell zu verbinden (siehe Abbildung 5.10). Wenn große Objekte mit wenigen Merkmalen gescannt werden, kann man dem Scanner helfen, indem man kleine reflektierende Punkte an verschiedenen Stellen des Objekts anbringt. Der



*Abbildung 5.10: Software, die mehrere Scans des Motivs verknüpft. Haar wird nicht gut gescannt und muss deshalb vor dem Ausdruck bearbeitet werden.*

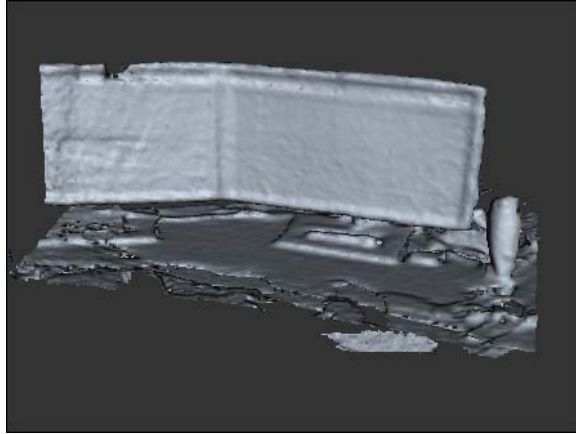
Scanner kann anhand der Punkte die Ausrichtung verschiedener Teile des Scans berechnen, wie wir es für unser liegendes Modell in Abbildung 5.10 gemacht haben.

Im Handel erhältliche 3D-Scanner erzeugen sehr hochauflösende Modelle der gescannten Objekte. Dabei kann es sich um kleinere Handgeräte handeln, aber auch um größere, komplexere Systeme, die mehrere Winkel gleichzeitig abbilden. Scanner können die innere Oberfläche von Rohren, Grubenschächten oder unterirdischen Höhlen abbilden, oder sogar ganze Baustellen für große Bauprojekte scannen. Sie setzen dazu RADAR-ähnliche Tools ein, wie etwa LiDAR. Solche Systeme werden im Bergbau oder bei der Berechnung des Erzabbaus verwendet oder für die Erstellung digitaler Geländekarten.

Im Handel erhältliche Systeme, wie beispielsweise Creaform, FARO, und zahlreiche andere Alternativen erzeugen sehr hochauflösende Objektmodelle, die für industrielle Anwendungen und die Herstellung geeignet sind. Für private Anwender sind jedoch Scanner mit einer geringeren Auflösung ausreichend – wie der, der im Videospiel-Controller von Kinect eingebaut ist –, um Objekte für den 3D-Druck zu modellieren. In Kombination mit Software wie SCENECT, ReconstructMe oder Microsoft Fusion kann das Bewegungs-/Abbildungs-System des Kinect-Controllers verwendet werden, um zuhause gescannte 3D-Modelle zu erstellen. Ein Beispiel dafür ist ein Bild des Schreibtischs von Kirk, wie in Abbildung 5.11 gezeigt.

## Strukturen aus Fotos erfassen

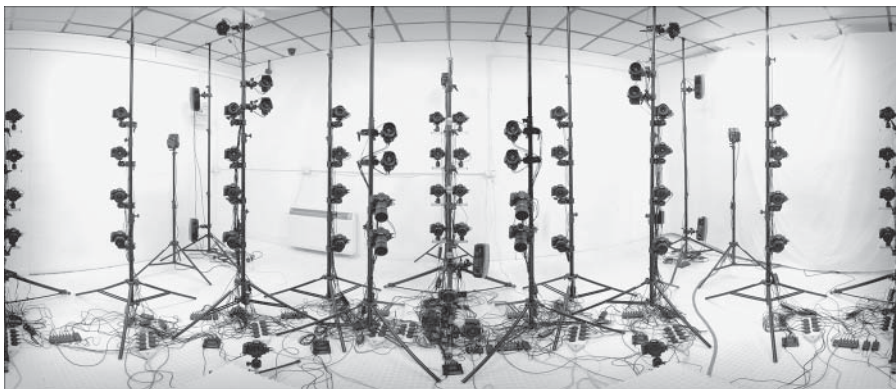
Eine sehr hochauflösende Modellierung für die Computergrafik kann mithilfe von 3D-Scannern durchgeführt werden, aber um bewegte Objekte zu erfassen – wie beispielsweise



*Abbildung 5.11: Ein Modell der Bildschirme und Lautsprecher auf dem Schreibtisch von Kirk, gescannt mit einem Microsoft Xbox Kinect Videospiel-Controller*

einen Läufer, der die Startblöcke verlässt –, benötigt man eine andere Technik, die sogenannte *Fotogrammetrie*. Die Fotogrammetrie verwendet mehrere 2D-Fotos, um die Form von Objekten im Sichtfeld zu berechnen. Durch die Aufnahme von mehreren Fotos zum selben Zeitpunkt können bewegte Objekte genauso einfach erfasst werden wie ein stehendes Objekt, wie es für 3D-Scanner erforderlich ist.

Fotogrammetrische Ergebnisse sind häufig nicht so präzise wie ihre gescannten Äquivalente, weil alle Punkte, basierend auf den Differenzen zwischen zwei Punkten, berechnet werden, die an leicht unterschiedlichen Positionen aufgenommen werden. Professionelle Fotogrammetrie-Studios, wie das in Abbildung 5.12 gezeigte, können sorgfältig ausgemessene Positionen für jede Kamera verwenden – und hochpräzise kalibrierte Felddiefenmessungen



*Abbildung 5.12: Fotogrammetrisches Studio mit 110 Canon DSLR-Kameras, die über 6 Laptops synchronisiert werden  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von Lee Smith/Infinite Realities)*

für Linsen und Beleuchtung –, um die bestmögliche Erfassung bewegter Motive zu erzielen. Modelle, die Systeme wie dieses verwenden, können Details bis hin zu einzelnen Haaren am Arm des Fotomodells erfassen, abhängig von der Art der Linsen und der Anzahl der verwendeten Kameras.

Fortschritte im Bereich der Rechenleistung, insbesondere bei den GPGPU-Prozessoren der Grafikkarten, haben dazu geführt, dass auch private Anwender ohne Supercomputer die Fotogrammetrie nutzen können.

Frühe »Structure from Motion«-Techniken wurden in kommerziellen Softwarepaketen wie PhotoScan von AgiSoft angeboten, wie in Abbildung 5.13 gezeigt. Mit demselben Paket konnten 3D-Modelle für Film-CGI und für Videospiel-Designer und Künstler erfasst werden, die ihre Motive komplett und in voller Bewegung aufnehmen wollten.

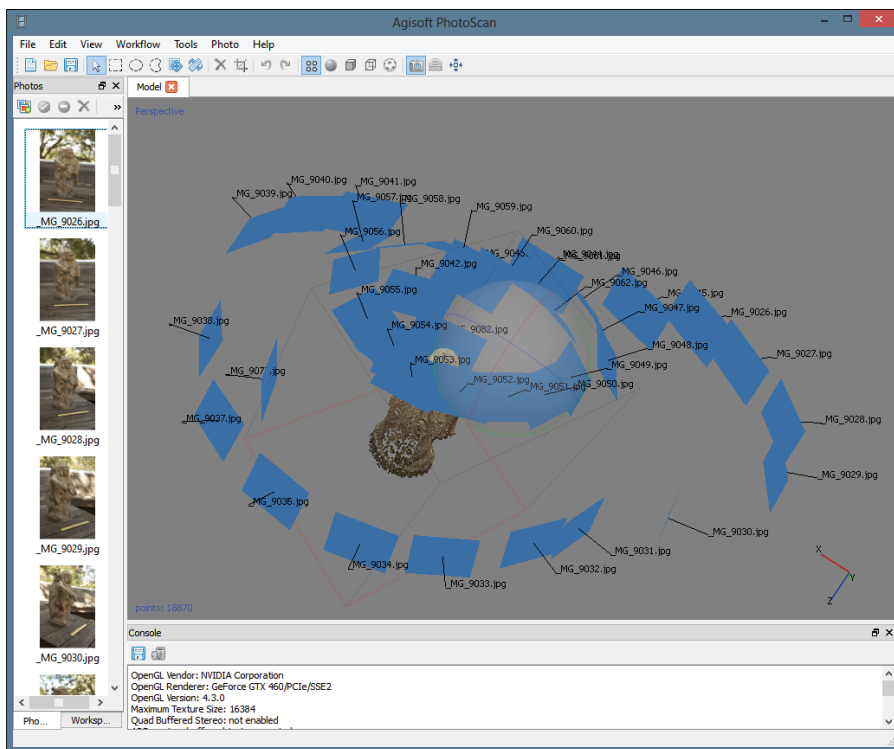


Abbildung 5.13: Fotogrammetrie auf dem lokalen Computer von Kirk, wo er mit PhotoScan von AgiSoft ein Objekt aus verschiedenen, rund um das Objekt herum aufgenommenen Fotos berechnet

Da die Rechenleistung ständig zunimmt, wurden fotogrammetrische Anwendungen entwickelt, die in mehreren, verschiedenen Fotos ähnliche Eigenschaften finden und daraus die relative Position für die Kamera für jedes Foto berechnen können, ohne dass eine Feinausrichtung notwendig ist, wie sie bei einem professionellen Studio stattfindet.

Vor Kurzem hat ein Hobby-Anwender mit seiner Google Glas-Kamera mehrere Aufnahmen einer Statue im Museum gemacht, die er dann mit der kostenlosen, auf der Cloud basierenden Anwendung 123D Catch von Autodesk als 3D-Modell rekonstruiert hat. Niemand hat bemerkt, wie er das Kunstwerk im Museum erfasst hat, weil er dazu ein Skript angewendet hat, das bei jedem Zwinkern ein Foto von der Situation unmittelbar vor ihm aufgenommen hat. Diese Möglichkeit beängstigt natürlich die Designer der Automodelle des nächsten Jahres – von Modedesignern nicht zu sprechen! –, weil ihre einzigartigen Kreationen möglicherweise schon in dem Augenblick vollständig erfasst werden, wenn ein Modell eines neuen Designs öffentlich vorgestellt wird. Wenn die additive Fertigung weiter ausgereift sein wird, kann ein Hersteller irgendwo auf der Welt schon Kopien der Designs in tragbarem Material anfertigen, noch bevor das Modell in die Geschäfte gelangt.

Als Teil seiner auf der Cloud basierenden Modellierungsservices gestattet das bekannte 123D Catch von Autodesk den Benutzern von Tablets und PCs, eine Fotogrammetrie durchzuführen, auch wenn ihre lokalen Computer nicht über genügend Ressourcen verfügen, um alle Detailübereinstimmungen innerhalb einer annehmbaren Zeit zu verarbeiten. Beispielsweise hat Kirk aus mehreren Fotos zuhause das Modell einer Kriegerstatue extrahiert (siehe Abbildung 5.14). Dafür brauchte er etwas mehr als fünf Tagen. Dieselbe Umwandlung



*Abbildung 5.14: Ein 3D-Modell, das unter Verwendung der Fotogrammetrie und ein paar Fotos erstellt wurde*

konnte mit der kostenlosen Funktion »Create 3D Model« der browserbasierten Autodesk 360-Benutzeroberfläche innerhalb von drei Stunden erledigt werden.

Fotogrammetrische Oberflächenberechnungen können genutzt werden, um 3D-Modelle von Statuen, bewegten Menschen oder Tieren zu erfassen, selbst wenn ein hochauflösender 3D-Scan nicht schnell genug ist, um alle Details des Motivs aufzunehmen. Dieselben Systeme können jedoch Fotos zusammensetzen, um Modelle von Gebäuden zu schaffen – oder von Grundstücken, die im Hinblick auf die landwirtschaftliche Nutzung überprüft werden sollen. Mit einem Quadrocopter oder einem anderen unbemannten Flugobjekt mit Kamera können Architekten ein 3D-Modell eines Gewerbegebiets erfassen, indem sie das Fahrzeug einfach darüber fliegen lassen und dann in einer fotogrammetrischen Lösung ein Modell davon erstellen. Mithilfe von fernbedienten Unterwasserfahrzeugen fangen Forscher der Meeresarchäologie heute an, diese Funktion zu nutzen, um die Wracks und den Müll auf dem Meeresboden zu kartieren und ihre Tauchgänge für die Bergung zu planen, noch bevor die erste Person ins Wasser gegangen ist.

## *Vorbereitung von Modellen auf den Druck*

Ein 3D-druckbares Objekt muss eine facettenreiche Form haben – und es darf keinerlei Löcher aufweisen. Es muss (im Wesentlichen) »wasserdicht« sein, damit es erfolgreich gedruckt werden kann. Ein Loch durch das Objekt ist kein Problem, man kann also problemlos einen Donut drucken, aber ein Loch an der Oberfläche eines Objekts muss gefüllt oder abgedeckt werden, um eine stetige Außenfläche zu bilden, damit es gedruckt werden kann. Wenn ein Scanner die Form eines 3D-Objekts berechnet, verwendet er dafür nur die gescannte Oberfläche (die Außenseite), deshalb müssen kleinere Löcher und andere Unregelmäßigkeiten möglicherweise repariert werden, bevor das Design fertig ist.

Einige Modelle müssen aufbereitet werden, damit sie für den 3D-Druck geeignet sind – unabhängig davon, ob sie per CAD entworfen, in den Computer eingescannt oder unter Verwendung der Fotogrammetrie aus Fotos berechnet wurden. Löcher in der Oberfläche müssen repariert werden. Falsch ausgerichtete Flächen müssen korrigiert werden (ein Modell hat nur eine Außenseite ohne Innenseite, deshalb kann es vorkommen, dass die Ergebnisse verwechselt werden, wenn sich zwei Modelle schneiden). Überflüssige Details müssen möglicherweise entfernt werden, sodass nur der Teil übrig bleibt, den Sie drucken möchten. Abbildung 5.15 zeigt die hinzugefügten Details, die von den Fotos erfasst wurden, aus denen Kirk die Kriegerstatue aus Abbildung 5.14 erstellt hat, und die er löschen musste. Außerdem musste er das Loch auffüllen, wo die Grundplatte des Kriegers auf den Boden trifft.

Das Modell des Schädels von König Richard III. wurde unter Verwendung der hervorragenden kommerziellen Anwendung Geomagic FreeForm erstellt, aber es gibt auch zahlreiche kostenlose Software-Tools, die für den privaten oder schulischen Bereich geeignet sind. Die nächsten Abschnitte bieten einen Überblick.

## *3D-Modell-Viewer*

Eine der einfachsten Ergänzungen Ihres Werkzeugkoffers ist eine Art 3D-Objekt-Viewer, mit dem Sie Ihr Objekt inspizieren können, bevor der 3D-Druck beginnt. Die Steueroberfläche





*Abbildung 5.15: Das vollständige 3D-Modell der Kriegerstatue, bevor sie bereinigt und auf den 3D-Druck vorbereitet wurde*

des 3D-Druckers verwendet ein System wie dieses, um Dinge auf der Aufbauplatte auszulegen, bevor der Druck beginnt. Andere Optionen können eine schnelle Auswahl zwischen den Modellen unterstützen. 3D-Modelle können in der Steuersoftware für einen 3D-Drucker angezeigt werden, wie beispielsweise MakerWare von MakerBot, der Open Source-Oberfläche Repetier oder in eigenständigen Produkten wie der kostenlosen Anwendung STL Viewer.

### Mesh-Modellierer

Der Begriff *Mesh* beschreibt die Oberfläche eines 3D-Modells, die unter Verwendung vieler kleiner Dreiecke definiert wird. Viele Tools können 3D-Design in Formaten wie PLY, STL, OBJ, COLLADA und anderen Typen für die Dateispeicherung exportieren. Ein Tool wie das kostenlose, als Open Source-Software bereitgestellte MeshLab kann dazu beitragen, diese in den Dateityp umzuwandeln, den Ihr 3D-Drucker braucht. Mithilfe anderer Mesh-Modellierer – wie beispielsweise der kostenlose MeshMixer von Autodesk – können Sie Teile eines Scans oder eines fotogrammetrischen Meshs entfernen, die Sie nicht haben wollen, oder Sie können es nutzen, um Löcher in einem unvollständigen Mesh zu schließen.



## *Mesh-Reparaturwerkzeuge*

Neben MeshMixer und MeshLab gibt es noch Tools, die hervorragend geeignet sind, eine facettenreiche Objektoberfläche zu schaffen. Dabei wird die Oberfläche erweitert, um Lücken zu füllen oder um überlappende Bereiche zu ergänzen, wo sich zwei facettenreiche Oberflächen treffen. Eines der gebräuchlichsten Werkzeuge dafür ist das kommerzielle netfabb Studio, von dem auch eine kostenlose Basisversion für den privaten, nicht gewerblichen Einsatz verfügbar ist. Solche Tools automatisieren die Vorbereitung und die Reparatur von 3D-Objekten ganz einfach und sind äußerst praktisch für Neulinge in der 3D-Modellierung.



netfabb umfasst auch ein Toolpath-Management für RepRap-Drucker, aber wir werden Ihnen später in diesem Buch Alternativen für die verschiedenen Drucker-typen vorstellen.



## Teil III

# Die gewerbliche Seite des 3D-Drucks



## ***In diesem Teil ...***

- ✓ Erfahren Sie, wie der 3D-Druck die Welt des Handels und der Herstellung ändern wird.
- ✓ Lernen Sie, wie ein einzigartiges 3D-Druck-Design erstellt und in einem ganz persönlichen Onlineshop verkauft werden kann.
- ✓ Lernen Sie die Möglichkeiten der Verwendung eines auf einem abgelaufenen Patent basierenden Designs kennen.
- ✓ Betrachten wir die ethische Seite der additiven Fertigung.
- ✓ Schauen wir in die Zukunft des 3D-Druck-Designs.

# Ausrichtung des 3D-Drucks an die Marktanforderungen



## *In diesem Kapitel*

- ▶ Die Herstellung demokratisieren
  - ▶ Persönliche Shops erstellen
  - ▶ Unmögliche Objekte erstellen
  - ▶ Neue Tools entwickeln
- 

Neben der Möglichkeit, kleine Plastiktiere für die Partys Ihrer Kinder auszudrucken, bietet der 3D-Druck eine Menge Gelegenheiten, Geld zu verdienen, die noch vor ein paar Jahren undenkbar waren. Die erste gewerbliche Anwendung der additiven Fertigung war das Prototyping. Die einfache einmalige Herstellung eines Produkts für Tests wurde schon bald als »schnelles Prototyping« bekannt. Viele Produkte werden getestet, indem über eine additive Fertigungstechnik ein physisches Modell erstellt wird, sodass die Kunden an einem echten Modell des geplanten Produkts feststellen können, ob es passt und ob alle Steuerelemente und mechanischen Funktionen an geeigneter Stelle angeordnet sind. Die Herstellung schneller Prototypen im 3D-Druck mit unterschiedlichen Designs ist nach wie vor ein wichtiger Anwendungsbereich, aber die Technik ist längst weiter fortgeschritten, sodass jetzt auch mit Metall und Keramik gearbeitet werden kann, um dauerhafte Produktionsgüter herzustellen. Dieses Kapitel betrachtet viele der neuen Verwendungszwecke moderner additiver Fertigungssysteme, die bereits jetzt völlig neue Industriezweige für die Erforschung und Marktanpassung schaffen.

## *Demokratisierung der Herstellung*

Riesige Unternehmen wie beispielsweise Microsoft nutzen die additive Fertigung, um Prototypen für ihre neuesten Videospiel-Controller herzustellen. Kleine Unternehmen können neue Produkte ausprobieren, die unter Verwendung der herkömmlichen Fertigungsketten nie möglich gewesen wären. Indem mehrere Durchgänge unter Beteiligung von Designern, Bildhauern, Werkzeugmachern und unzähligen anderen Spezialisten übersprungen werden, die das Budget kleiner oder neu gegründeter Unternehmen übersteigen würden, die versuchen, Fuß in einem neuen Markt zu fassen, schafft der 3D-Druck eine echte Demokratisierung des Herstellungsprozesses (er wird »den Menschen« eröffnet). Er stellt einen Mechanismus bereit, mit dem ein Einzelner eine Idee mithilfe einer kostenlosen und offenen Software entwerfen und diese Idee dann für den Test in einen Festkörper umwandeln kann, entweder als Modell für die herkömmliche Fertigung – oder als direkt verkäufliches Produkt.

Die folgenden Abschnitte beschreiben einige moderne gewerbliche Anwendungen der additiven Fertigung.

### **Abgeleitete Designs**

3D-Drucker, die Festkörper aus Metall und Keramik anfertigen können, gestatten modernen Goldschmieden, attraktive Schmuckstücke zu entwerfen und anzufertigen. In Produktionen mit kleiner Stückzahl können sie spezielle Einzelstücke anfertigen, die genau auf den Geschmack des jeweiligen Kunden zugeschnitten sind. Selbst Menschen, die keine Ausbildung in der Metallbearbeitung oder anderen Fertigungsprozessen haben, können neue Stücke schaffen. Die Flexibilität der 3D-Drucker bedeutet, dass am Computer ein völlig neues Design geschaffen oder aus verschiedenen Elementen anderer Entwürfe zusammengesetzt werden kann, um es schließlich anzufertigen.

Viele individualisierte Entwürfe entstehen durch die Kombination von 3D-druckbaren Modellen. Beispielsweise könnten Sie Hasenohren auf einen Frosch setzen oder Ihren eigenen Kopf (oder einen 3D-Scan Ihres kleinen Bruders) auf eine Davidstatue von Leonardo da Vinci. Diese Personalisierung von Produkten wird beispielsweise auf 3D-gedruckte Schokoladen und zahlreiche andere Geschenkartikel angewendet, die heute von findigen Unternehmern angeboten werden. Dazu braucht man nichts weiter als einen Kinect-Scanner, eine kostenlose Design-Software sowie einen 3D-Drucker in Verbraucherqualität.

### **Kunstgegenstände aus Museen**

Einige Unternehmen verwenden 3D-Drucker, um massive Versionen digitaler Modelle zum Kauf anzubieten oder in Galerien als Ausstellungsstücke zu zeigen. So scannt das hauseigene Bearbeitungsteam des Smithsonian Institute gerade Kunstgegenstände aus seiner riesigen Sammlung ein und erstellt 3D-Modelle von Objekten (siehe Abbildung 6.1), die dann an einem beliebigen Ort zur Ansicht reproduziert werden können, ohne dass die Originale einem Risiko ausgesetzt werden. Viele Kunstwerke sind einfach zu empfindlich oder zu wertvoll, als dass man es riskieren wollte, sie rund um die Welt zu transportieren. Vierzehn Millionen Stücke könnten auf diese Weise durch das aus zwei Personen bestehende Digitalisierungsteam des Smithsonian Institute erfasst werden. Dort setzt man Laser-Scanner ein, um hochauflösende Modelle von Werken aus dem Archiv des Museums als auch von Kunstwerken aus anderen Museen und Standorten auf der ganzen Welt zu reproduzieren.

Das Digitalisierungsprojekt des Smithsonian Institute ist nicht auf Gewinn ausgelegt, aber andere Museen und Ausstellungen beginnen langsam, ähnliche Verfahren zu nutzen, um Sammlungen der seltensten Kunstwerke auf der Welt anzulegen, ohne das Risiko der Beschädigung oder des Verlusts einzugehen, und sie gegen Lizenz in anderen Museen ausstellen zu lassen. Viele Designs werden kostenlos erfasst und weitergegeben. Abbildung 6.2 zeigt einen Teil der Kunstgegenstände, die Museen in das Thingiverse 3D-Modellverzeichnis hochgeladen haben, von wo sie jeder ganz einfach herunterladen kann. Mit solchen Modellen ist es möglich, sich im Wohnzimmer Exemplare der wichtigsten historischen, künstlerischen und kulturellen Errungenschaften aus der ganzen Welt aufzustellen oder sie in der Schule zu präsentieren,

um den Schülern die Welt der Kunst anschaulich näherzubringen. Falls die Lizenzierung für ein 3D-Modell seine gewerbliche Wiederverwendung gestattet, ist es möglich, Gegenstände aus einem 3D-Drucker an Schulen, Museen oder private Sammler zu verkaufen.



*Abbildung 6.1: Digitalisierung einer Bronzestatue von Thomas Jefferson und eine Reproduktion in voller Größe  
(Bild mit freundlicher Genehmigung des Smithsonian Institute)*

### Modelle erstellen

Die Arbeit des Digitalisierungsteams des Smithsonian Institutes (die sogenannten »Laser Cowboys«) stellt nur eine der vielen Möglichkeiten für eine einträgliche Arbeit mit dem 3D-Druck dar (siehe den vorherigen Abschnitt). Täglich entstehen viele andere Jobs rund um die Erfassung von 3D-Modellen, sei es für die Ausstellung von Kunstgegenständen, die stylische Modellierung neuer Designs für Gebrauchsgegenstände, die Erstellung von Stadtsilhouetten für Stadtplaner oder die Erfassung lebender Organismen in der Medizinindustrie.

Nicht bei allen diesen Jobs erzeugt man das digitale Modell einfach mit dem Hand-Laser, wie in Abbildung 6.3 gezeigt. Unbemannte Flugobjekte werden zum Beispiel über ganze Städte manövriert, um 3D-druckbare Modelle von Gebäuden zu erzeugen. Dazu verwendet man die Fotogrammetrie (siehe Kapitel 5). Mithilfe von CT-Scans werden 3D-Modelle von alten Skelettüberresten erstellt. Und mit der Ultraschall-Bildgebung kann eine Mutter die Entwicklung ihres ungeborenen Babys beobachten. Und das sind nur einige wenige Beispiele



für die verschiedenen Gelegenheiten für neue Branchen, die um die additive Fertigung herum entstehen, und für die ein völlig neues Wissen erforderlich ist.

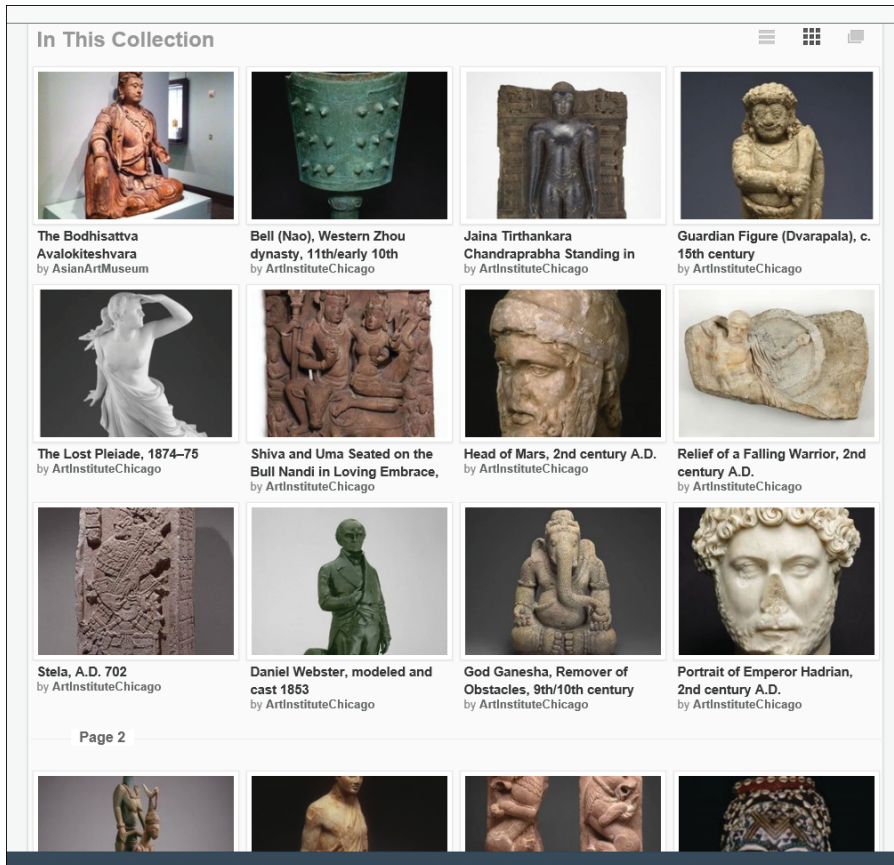


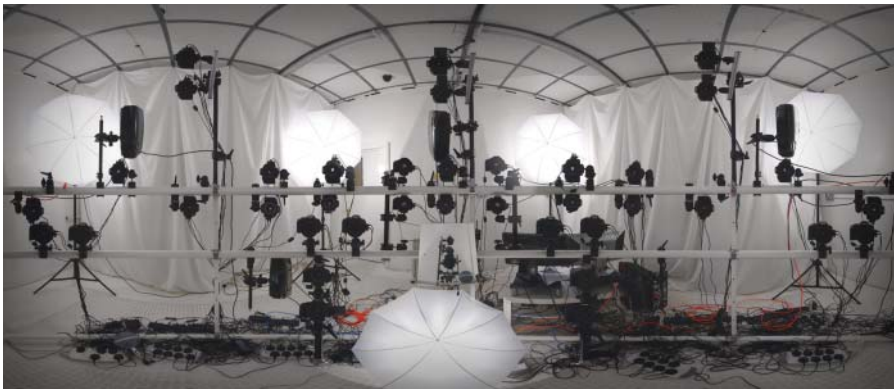
Abbildung 6.2: Museen veröffentlichen 3D-Modelle ihrer Kunstwerke, die über das Thingiverse-Verzeichnis heruntergeladen werden können.

Das in Abbildung 6.4 gezeigte Studio zeigt ein Beispiel für eine neue Branche aus der 3D-Modell-Welt, wo die Erfassung von unbewegten oder bewegten lebenden Menschen völlig neue Techniken im Bereich des Animationsfilms schafft. Hollywood hat bereits in vielen neuen Filmen den 3D-Druck eingesetzt. Beispielsweise hat man maßgeschneiderte Handschuhe für die Rüstung von *Iron Man 2* angefertigt, oder die durchsichtigen, passgenauen Helme für den Film *Prometheus*. Für den Film *ParaNorman* druckte das Animationsteam farbige 3D-Druck-Modelle für die Gesichter der per Stop-Motion animierten Besetzung mit unterschiedlichen Gesichtsausdrücken einfach als zusätzliche Kopien der Köpfe des jeweiligen Charakters aus und setzte sie dann in den entsprechenden Einzelbildern ein, die für eine animierte Szene aufgenommen wurden. Selbst das atemberaubende Auto im James Bond-Film *Skyfall* wurde unter Verwendung hochauflösender Scans und eines sehr großformatigen Druckers erstellt,

um eine Requisite als Ersatz für den echten 1960 Aston Martin DB 5 zu erstellen, der für eine Explosion im Film einfach zu teuer gewesen wäre.



*Abbildung 6.3: Mithilfe eines FARO-Lasers wird ein 3D-Modell dieser Maske erstellt.  
(Bild mit freundlicher Genehmigung des Smithsonian Institute)*



*Abbildung 6.4: Studio für eine hochauflösende 3D-Erfassung von Gesichtsmodellen  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von Infinite Realities/Lee Perry Smith)*

Mittlerweile wird der 3D-Druck auch für die Produktion von Fernsehsendungen verwendet. In »CSI« werden 3D-gedruckte Waffen verwendet, in »Hawaii Five-O« werden 3D-gedruckte Fälscher-Matrizen verwendet, und in »The Big Bang Theory« werden 3D-gedruckte Actionfiguren der Charaktere Howard und Raj verwendet. Die Nachbildung spezieller Requisiten-Modelle aus Film und Fernsehen schafft neue Möglichkeiten der Kommerzialisierung – aber gleichzeitig tritt das Problem des Rechts auf geistiges Eigentum und der Kontrolle über Marken

oder den Copyright-Schutz auf. Ein Beispiel dafür ist der Techniker Todd Blatt, dessen selbst gebautes Modell des Alien Cube aus dem Film *Super 8* zu einer Abmahnung durch das Filmstudio Paramount führte. Das Studio hatte die Lizenz für die Reproduktion von Sammelgegenständen bereits an ein anderes Unternehmen verkauft, einschließlich des Würfels. Es kam zum Rechtsstreit, weil das von Blatt selbst entworfene Modell einfach von den Fans dieses Films hätte heruntergeladen und zuhause gedruckt werden können. (In Kapitel 7 wird es detaillierter um die Auswirkungen des 3D-Drucks auf das Recht auf geistiges Eigentum gehen.)

Der Verkauf von 3D-Modellen anstelle von physischen Objekten ist eine weitere Möglichkeit, den 3D-Druck gewerblich zu nutzen. Ein wertvolles »Produkt« (nämlich das Design) wird bereitgestellt, um Objekte auf lokalen 3D-Druckern oder bei Druck-Shops auszudrucken. Wenn die additive Fertigung erst mehr verschiedene Materialien und Anwendungsbereiche abdeckt, können Shops für individuelle Designs 3D-gedruckte Folien oder Gehäuse für unsere Technologieprodukte anbieten – ein umfangreiches Spektrum an Gelegenheiten für neue Branchen – und Geld verdienen, indem sie Zugang zu 3D-Modellen verkaufen, anhand derer physische Objekte erstellt werden können.

Momentan erforscht man Techniken, um die Anzahl der Kopien einzuschränken, die auf Grundlage eines 3D-Modells erstellt werden können. Dies betrifft auch die Materialien, die für die Fertigung genutzt werden. Die Verfügbarkeit privater 3D-Drucker oder kleiner 3D-Industriedrucker schafft natürlich Wege, diese Einschränkungen nach dem aktuellen Stand der Technik zu umgehen, weil beispielsweise eine Kartusche mit Aluminiumpulver von einem Techniker ganz einfach durch eine Kartusche mit Titanpulver ausgetauscht werden kann.



Microsoft arbeitet derzeit daran, ein spezifisches Innenmuster in den Hohlräumen von 3D-gedruckten Objekten anzubringen, um das Objekt dem 3D-Drucker zuordnen zu können, auf dem es erstellt wurde – ähnlich wie ein 2D-Farbdrucker seine Seriennummer und das Datum/die Uhrzeit auf jedem Dokument mit kleinen gelben Punkten ausdruckt, die für den Betrachter nicht erkennbar sind.

## Private Shops

Selbst wenn Sie keinen 3D-Drucker haben, können Sie sich einen Onlineshop zulegen, um Ihre eigenen Designs zu verkaufen. Dazu nutzen Sie einen Service wie beispielsweise Ponoko, Shapeways oder iMaterialize. Diese Services haben eigene 3D-Drucker, und sie gestatten es den Anwendern, ihre eigenen Designs hochzuladen, die dann ausgedruckt und innerhalb weniger Tage versendet werden. Diese Designs sind nicht auf 3D-gedruckte Plastikkätzchen begrenzt – es können höchst künstlerische und kreative Dinge entstehen. Abbildung 6.5 zeigt den Onlineshop des Mathematikünstlers Asher Nahmias bei Ponoko, der unter dem Namen Dizingof läuft.

Viele der erfahreneren Onlineshop-Anbieter für 3D-gedruckte Waren bieten bereits eigene Tools für das Design und die Erstellung der zu verkaufenden Waren an. Dadurch wird es für Hobby-Anwender ohne CAD-Hintergrund noch einfacher, auf diese Technik zuzugreifen.

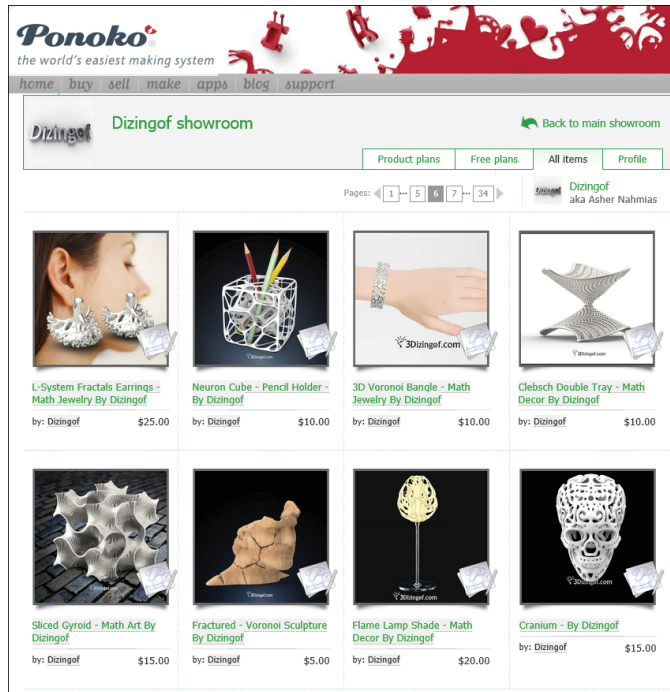


Abbildung 6.5: Der Onlineshop des Künstlers Asher Nahmias (Dizingof) bei Ponoko

## Ein einzigartiges Design

Um die Leistungsstärke von solchen Services zu demonstrieren, haben wir mit einem der Tools von Shapeways einen 3D-gedruckten »Für Dummies«-Schlüsselanhänger erstellt, um eine 2D-Grafik in ein 3D-Modell umzuwandeln. Dazu sind folgende Schritte notwendig. (Bitte beachten Sie, dass alle diese Schritte bis zur Bestellung des fertigen Objekts kostenlos waren.)

1. Erstellen Sie den Schwarz-Weiß-Text und das Grafikdesign unter Verwendung einer kostenlosen Onlinetextverarbeitung.
2. Nachdem Sie den Text und das Bild nach Ihren Vorstellungen erstellt haben, speichern Sie alles als Bild auf Ihrer Festplatte.
3. Laden Sie Ihr Bild in das Design-Tool *2D-to-3D* von Shapeways hoch und wählen Sie die Stärke des Designs aus.

Sie können hier das endgültige Objekt erstellen, aber um ihm einen interessanteren Hintergrund und eine Umrandung zu geben, haben wir noch ein paar zusätzliche, optionale Schritte gemacht:

- Exportieren Sie die von dem Shapeways-Tool erzeugte STL-Datei und importieren Sie sie in die kostenlose TinkerCAD-Software von Autodesk, um die Details aus Abbildung 6.6 hinzuzufügen.



Abbildung 6.6: Der Schlüsselanhänger »3D Printing For Dummies«, fertig zum Download

- Nachdem Sie einen gewölbten, erhöhten Rahmen und einen festen Hintergrund zur Verbindung des Bilds und aller Buchstaben erstellt haben, exportieren Sie das Design wieder als STL auf Ihren Computer.

#### **4. Warten Sie geduldig auf die ausgedruckte Version.**

Für die Bestellung des Schlüsselanhängers bei Shapeways gaben wir das Material »Alumide« an, eine hübsche Mischung aus Kunststoff und Aluminiumflocken. Das Objekt wurde ca. zwei Wochen später geliefert (siehe Abbildung 6.7).



Abbildung 6.7: Der Schlüsselanhänger »3D Printing For Dummies«, wie er von Shapeways geliefert wurde



### Herstellung eines einmaligen Produkts auf Anforderung

Weil Kirk so glücklich mit dem Modell war, das er, wie im vorigen Abschnitt beschrieben, erstellt hat, hat er es in seine Shapeways-Sammlung hochgeladen, damit Kunden es bestellen können. Außerdem hat er es in seinem Onlineshop KKHausman veröffentlicht, wo es zu Preisen zwischen 4 Dollar (weißer Kunststoff) und 85 Dollar (poliertes Silber) bestellt werden kann. (siehe Abbildung 6.8).



Natürlich hätte Kirk den Schlüsselanhänger nicht ausdrucken lassen müssen, und natürlich erwartet er nicht ernsthaft, dass sich jemand eine Kopie dieses doch eher einfachen Designs kauft – und schon gar nicht in poliertem Silber. Wir wollten nur die Verfahrensweise zeigen, wie Sie Ihre eigenen Designs zum Kauf anbieten können – und dazu nichts weiter brauchen, als Kreativität und ein paar kostenlose Online-Tools. Sie können bestimmen, welche Materialien bestellt werden können, und welcher Preis dafür zu zahlen ist. Für dieses Beispiel haben wir alle verfügbaren Materialoptionen für ein so kleines Objekt ausgewählt, und den reinen Herstellungskosten 1 Dollar hinzugefügt, um die Verkaufsfunktion zu demonstrieren. Ihre eigenen Designs können natürlich viel komplizierter sein und entsprechend mehr kosten, ohne dass Sie jemals ein physisches Objekt davon erstellen müssen.

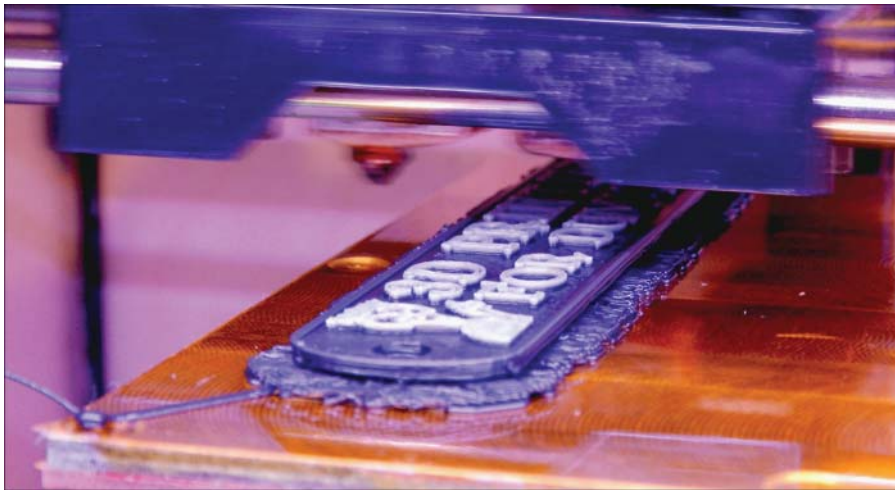


Abbildung 6.8: Der Schlüsselanhänger »3D Printing For Dummies«, wie er auf dem lokalen Drucker von Kirk unter Verwendung von weißem und schwarzem ABS-Kunststoff ausgedruckt wird

Der Ausdruck des im Beispiel gezeigten Schlüsselanhängers hat 15 Minuten gedauert, weil wir neben dem einfachen Text und der Grafik noch ein paar Details hinzugefügt haben. Wenn Sie nur ein paar eigene Platzkarten mit Ihrem Geschäftslogo für den Tisch Ihrer nächsten Vorstandsversammlung drucken wollen, geben Sie einfach den Text ein und verwenden die Standardoptionen, dann wird jede Karte innerhalb weniger Minuten gedruckt. Im Augenblick

dauert es noch ein paar Wochen, bis man die fertigen Produkte erhält, aber diese Zeit wird mit Sicherheit bald deutlich kürzer, sobald die Onlineanbieter mehr Drucker für die benutzerdefinierte Fertigung einsetzen. Außerdem werden ständig neue Materialien wie beispielsweise Keramik und kostbare Metalle (wie Gold oder Titan) angeboten, um die verfügbaren Optionen zu erweitern.

Services wie Shapeways und Ponoko bieten noch weitere Möglichkeiten, mit 3D-Druck Geld zu verdienen – entweder direkt, indem die Objekte für einen privaten Entwickler ausgedruckt werden, oder indem Designerstücke der allgemeinen Öffentlichkeit gewinnbringend verkauft werden. Wie andere Websites für Bastler, wie beispielsweise Etsy, profitieren diese Anbieter von ihrer Investition in hochwertige 3D-Drucker, die weit über das hinausgehen, was sich der durchschnittliche Privatanwender leisten kann.

Dank dieser Ausrüstung können einzelne Designer unterschiedlichste Shops komplett online betreiben – vom Design bis zur Bestellseite oder zum Fertigungssystem. Das fertige Objekt wird dann über den Service an den Kunden ausgeliefert. Das Design von 3D-gedruckten Objekten steckt noch in den Kinderschuhen, aber es werden zwei grundlegende Fertigkeiten dafür gebraucht:

- ✓ technische Erfahrung mit Software für die 3D-Modellierung
- ✓ künstlerische Begabung, um Designs zu schaffen, die den Verbraucher vom Kauf überzeugen, sodass sie mit den massengefertigten Waren mithalten können, die als »Modell dieses Jahres« gelten

Dieses neue Fertigungsparadigma gestattet, dass das Design für jeden Auftrag völlig neu angepasst wird. Es werden nicht ganze Lagerhalden mit Massenwaren gefüllt, und diese müssen auch nicht in riesigen Containern aus Billiglohnländern zu uns transportiert werden. Die additive Fertigung ist ein frühes Beispiel für das Potenzial einer transformativen Unternehmensevolution, die über die herkömmliche Massenanfertigung hinausgeht. Von daher ist es verständlich, dass dieses Potenzial den Ländern Sorgen bereitet, deren wichtigster Exportartikel die billige Arbeitskraft für die Herstellung von Massenwaren ist. In Kapitel 7 werden wir noch genauer auf das Potenzial des 3D-Drucks eingehen, die Fertigung im Zuge der »dritten industriellen Revolution« völlig neu aufzustellen.

## Unmögliche Objekte

Bestimmt gibt es weniger aufwändige Techniken für die Herstellung eines Massenprodukts aus Kunststoff, wie etwa den Schlüsselanhänger, den wir als Beispiel gezeigt haben. Doch wenn das Produkt komplexer wird, fällt dieser Vorteil weg. Angenommen, ein Namensschild soll aus Sicherheitsgründen und zur einfacheren Identifizierung eine 3D-Darstellung des Gesichts jeder Person neben dem Namen aufweisen, dann würden die Produktionskosten bei der herkömmlichen Fertigung dramatisch ansteigen (wenn die Produktion überhaupt möglich wäre). In solchen speziellen Fällen sind einige Dinge einfach nicht mehr zu vertretbaren Kosten herstellbar.

Es werden bereits 3D-gedruckte Roboterspielzeuge als Produkte verkauft – beispielsweise die wunderbare interaktive Puppe Makie –, aber dieses Konzept ist nicht auf Shops mit kleiner



Produktion begrenzt. Disney wendet bereits 3D-Drucksysteme an, um personalisierte Disney-Prinzessinnenpuppen mit dem Gesicht Ihrer Tochter statt dem von Belle oder Cinderella herzustellen, wenn Sie das 3D-Scan-Studio in einem der Vergnügungsparks besuchen. Disney verwendet den 3D-Druck auch, um Lichtleitungen direkt in Festkörper einzubetten, um so eine ganz spezielle Beleuchtung für seine Ausstellungen zu schaffen, wobei stromsparende LEDs anstelle der herkömmlichen Glühbirnen oder Leuchtstoffröhren verwendet werden – eine Beleuchtung mit einer verbesserten Abdeckung der Fläche, ganz auf die spezifische Verwendung und das Layout zugeschnitten.

Abbildung 6.9 zeigt drei der Printed Optics-Designs aus den Forschungslaboren von Disney, die jeweils einzigartige Muster aus Licht und Dunkelheit liefern, abhängig von den jeweiligen Anforderungen des beleuchteten Raums. Speichert man diese Designs in einem Computer, kann man bei Bedarf einfach eine neue Lichtquelle ausdrucken. Oder man kann eine alte Fassung wiederverwenden, indem man nur die Anordnung der Hohllichtleiter verändert wird.



*Abbildung 6.9: Die neuen Beleuchtungsdesigns von Disney verwenden 3D-gedruckte Hohllichtleiter.  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von Karl Willis/Disney)*

Dies ist ein weiteres Beispiel für das transformative Potenzial des 3D-Drucks, wo selbst bei der Wiederverwendung bereits vorhandener Objekte noch eine spezifische Anpassung des Designs an einen neuen Verwendungszweck erfolgen kann – oder wo nur die geänderten Komponenten ausgetauscht werden müssen, während kostspielige andere Elemente weiter genutzt werden können, bis sie nicht mehr funktionieren. Im Fall von Disney geht man für die LED-Leuchten von einer ununterbrochenen Nutzungsdauer von 20 Jahren aus, womit die Kosten für Energie und Austauschleuchten über die Lebensdauer einer Ausstellung maßgeblich reduziert werden.

Durch die Umwandlung der herkömmlichen, ungerichteten Beleuchtung in spezifische Lichtdesigns verringert Disney offensichtlich seine Betriebskosten und steigert die Attraktivität seiner Ausstellungen. Aber diese Designs können auch in Produkte umgewandelt werden, die

gewinnbringend an Dritte verkauft werden können, womit um die digitalen Designs jedes neuen Produkts herum ein neues Gewerbe geschaffen wird.

## Neue Tools

Ein weiterer Industriezweig, der das neue Potenzial des 3D-Drucks demonstriert, ist die Erstellung neuer Werkzeuge – sowohl für das Design von Objekten, als auch für die Herstellung bereits existierender Designs. Das wird möglich durch diese wunderbare Vielfalt an Optionen. 3D-Drucker müssen in der Lage sein, mit verschiedenen Materialien und Umgebungen zurechtzukommen. Ein 3D-Drucker, der Mondgestein in einer luftfreien Umgebung verarbeitet, muss gegenüber dem aktuellen Verfahren der Massenerstellung von Ziegeln und Betonsteinen für den herkömmlichen Bau abgeändert werden, ebenso wie ein tauchfähiges 3D-Druckwerkzeug in der Lage sein muss, beschädigte U-Boot-Teile unter Wasser zu reparieren, oder ein 3D-Bioprinter lebendes Gewebe im Körper reparieren muss. Gleichzeitig müssen die Software-Tools angepasst werden, die diese neuen Drucker steuern, um Techniken aus der Animationsmodellierung, aus der mathematischen Strukturanalyse und vielen anderen Disziplinen in Anwendungen zusammenzuführen, die das unglaubliche Potenzial dieser in Entwicklung befindlichen neuen Tools realisieren können.

## Mehr als nur massive Bausteine

Als Kirk begann, den Beruf des technischen Zeichners zu erlernen, verwendete er die traditionellen Werkzeuge – einen Stift und sein treues Kurvenlineal auf einem tragbaren Zeichentisch, den er immer noch mit sich herumschleppt, um ihn seinen CAD-Schülern zu zeigen, wenn sie sich wieder einmal darüber beschwerten, wie schwierig es ist, Festkörpermodellierungstechniken zu erlernen. Die CAD-Software hat sich weiterentwickelt, und man kann heute mit zwei Fingern auf einem Tablet arbeiten (wie wir an anderer Stelle in diesem Buch bereits angesprochen haben). Das Ganze ist so einfach geworden, dass die Kreationen der 7-jährigen Tochter von Kirk die Wände ihrer Wohnung schmücken. Es müssen noch ein paar kleinere Korrekturen vorgenommen werden, um Überhänge und innere Geometrien abzustützen, die sonst als lose Teile in inneren Hohlräumen herumschwirren würden, aber das liegt hauptsächlich daran, dass ein Großteil der heutigen CAD-Software darauf ausgelegt ist, Festkörper zu erzeugen.

Natürlich können die Objekte aus dem CAD auch Durchbrüche und Hohlräume besitzen, und sie können sogar mehrere Komponenten als Baugruppen aufweisen, die in die endgültige Form eingepasst werden müssen. Die meisten CAD-Programme entwerfen jedoch immer noch Objekte mit einem festen Volumen und Abgrenzungen, was zu relativ massiven Körpern in der endgültigen Form führt. 3D-gedruckte Materialien werden mit unterschiedlichen Materialtypen und Strukturen durch das gesamte Objekt hindurch entworfen – das in einem einzigen Durchgang hergestellt wird, ohne dass Unterkomponenten nach der eigentlichen Fertigung eingebaut werden müssen.

Um dieses Potenzial nutzen zu können, braucht man neue Werkzeuge, die Objekte erstellen können, deren innere Struktur und Porosität variiert, um beispielsweise Ablaufkanäle zu

formen, oder um ein geringeres Gewicht bei derselben strukturellen Stärke zu realisieren, als es die massiven Gegenstücke aufweisen. Vom Aufbau her, ist das nichts Neues – die Natur baut unsere Knochen seit Langem genau so auf – und die müssen funktionieren, sonst könnten beispielsweise Vögel nicht so einfach fliegen. Neue Softwareanwendungen wie beispielsweise der Within Medical-Designer (siehe Abbildung 6.10) werden entwickelt, um eine hybride Mischung aus festen und porösen Elementen in einem 3D-gedruckten Design zu unterstützen. Andere Varianten werden entwickelt, um Übergänge zwischen unterschiedlichen Materialien zuzulassen, ebenso wie variierende Materialdichten innerhalb eines Objekts.

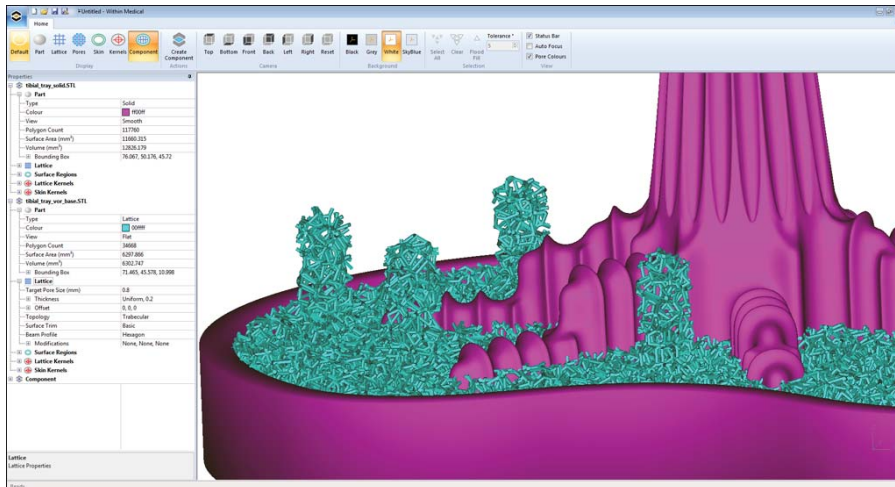


Abbildung 6.10: CAD-Design mit Within Medical, das feste und poröse Elemente für ein Knochenimplantat zeigt  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von Within Technologies)

Diese Werkzeuge schaffen völlig neue Industriezweige, wenn alle ihre Funktionen umsetzbar werden und neue Anwendungen in einer Produktionsumgebung gefunden werden. Die Produkte, die daraus entstehen, sind einem organischen Design sehr viel ähnlicher als Objekte aus massiven Bausteinen. Autodesk hat bereits sein Interesse an dem in Entwicklung befindlichen Bereich des Bioprintings ausgedrückt, und es untersucht bereits die Techniken, die eine Anwendung benötigt, um Gewebe und vollständige Organe aus lebendem Zellmaterial erstellen zu können. Von Rennautos bis hin zu NASA-Wohngebäuden im Weltall bietet die 3D-gedruckte Fertigung neue Produktionsmöglichkeiten und Ressourceneffizienzen, die sich auf zahlreiche Industriezweige auswirken werden. Kein Wunder, dass so viele neue Gelegenheiten für Softwaredesigner in diesem Bereich entstehen.

## Ein Werkzeug für ein Werkzeug

Werkzeuge für andere Werkzeuge herzustellen, ist eine altherwürdige Aktivität. Wenn Kirk Kursteilnehmer in der traditionellen Schmiedearbeit unterrichtet – mit einem Kohlefeuer,

einem glühenden Metallstück und einem Schmiedehammer –, beginnt er damit, seinen Schülern zu zeigen, wie sie ihre ersten Zangen und andere Werkzeuge herstellen können, die für das Schmieden benötigt werden. Als Jugendlicher aus Kentucky hat er gelernt, Eisen aus Erz zu schmelzen und Eisenblöcke in geschmiedete Formen umzuwandeln. Eine solche Form nutzte er, zusammen mit dem Holz von einem auf dem eigenen Grund der Familie gefällten Baum, um eine lange Schwarzpulver-Flinte zu bauen – eine funktionierende Feuerwaffe, die präzise genug ist, um Nahrung damit zu erjagen. Dies ist ein Beispiel für »lebendige Geschichte«, es zeigt, wie Werkzeuge gebaut werden, um andere Werkzeuge damit herzustellen und dass man Teile des Materials selbst beschaffen kann.

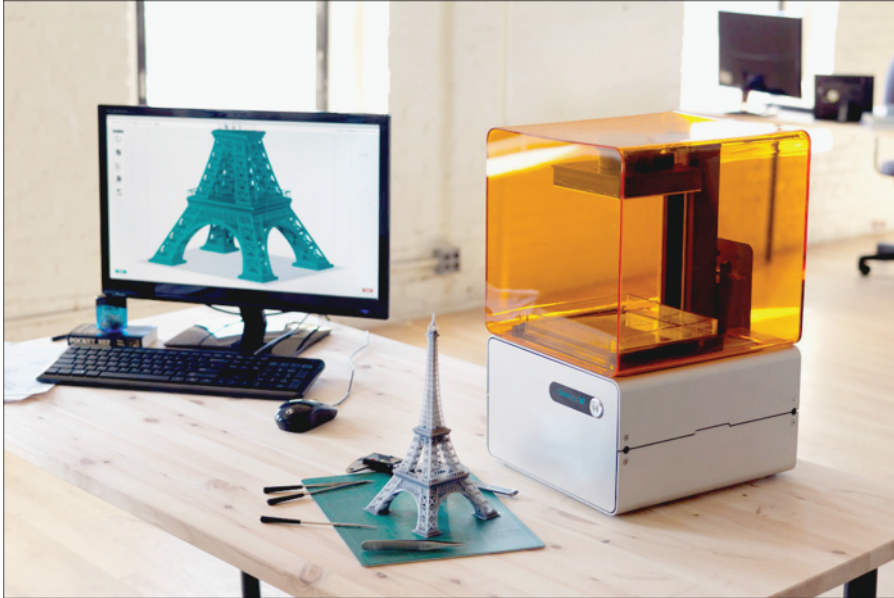
Und jetzt zurück zur Technologie des 21. Jahrhunderts: Wenn Kirk den Studenten die additive Fertigung erklärt, zeigt er ihnen, wie sie ihre eigenen 3D-Drucker bauen können. Wie man das anstellt, wird am Ende dieses Buchs beschrieben. Beginnend ab Kapitel 11 werden Sie erfahren, wie Sie einen eigenen 3D-Drucker aus einfachen Bausätzen bauen, die es heute schon gibt. Wenn Sie die Zeit und die Muße haben, können Sie natürlich auch alle benötigten Komponenten und Materialien selbst herstellen. Der aktuelle Stand im Bereich des 3D-Drucks ist vergleichbar mit den frühen Tagen des industriellen Designs, als es möglich war, eigene Tools zu erstellen und mit der Arbeit zu beginnen.

Die Schaffung neuer Druckerdesigns ist eine weitere Möglichkeit, wie der 3D-Druck heute kommerziell genutzt werden kann. Die explosionsartige Zunahme von im Handel erhältlichen Alternativen führt zu immer größeren Bauflächen und immer besseren Materialoptionen, um die unzähligen neuen Anwendungen zu unterstützen, die entwickelt werden, um die Anforderungen an die Fertigung in militärischen, medizinischen und raumfahrttechnischen Technologiebereichen zu erfüllen. Neben den kommerziellen Produkten wurden auch die Open Source-Designs Fab@Home und RepRap in Hunderten von verschiedenen Klon- und abgeleiteten Designs weiterentwickelt.



Eines der bekanntesten Designs ist MakerBot, entwickelt von Bre Pettis, Adam Mayer und Zack Smith, dem Mitbegründer des bekannten 3D-Modell-Verzeichnisses Thingiverse. Das ursprüngliche CupCake-Design von MakerBot basierte auf Open Source-RepRap-Systemen, hat sich aber durch mehrere Runden von Open Source-Derivaten zu einem Closed Source-Produkt auf einer Ebene für professionelle Benutzer weiterentwickelt: Replicator 2/2X. Dieser kommerzielle 3D-Drucker ist Objekt der Begierde vieler Schulen und Fertigungslabors. MakerBot wurde vor Kurzem an Stratasys verkauft, womit eines der beliebtesten FDM/FFF-Druckerdesigns zu dem Unternehmen zurückkehrte, das die ursprünglichen Patente für die additive FDM-Fertigung besaß.

Wenn Sie Crowdfunding-Sites besuchen, wie beispielsweise Kickstarter, IndieGoGo oder RocketHub, werden Sie feststellen, dass sich neue Designs und Konfigurationen von 3D-Druckern ständig weiterentwickeln – von dem auf SLA basierenden Form 1-Drucker (siehe Abbildung 6.11) bis hin zu den neuesten Versionen des RepRap-Druckers, mit stetig abnehmenden Kosten, geringeren Stückzahlen und größerem Druckbereich, weil Hobby-Anwender das grundlegende Open Source-Hardware-Design übernehmen und immer komplexere Abwandlungen schaffen.



*Abbildung 6.11: Der Form 1 SLA-Drucker, der auf Kickstarter erfolgreich finanziert wurde, indem innerhalb von 30 Tagen fast 3 Millionen Dollar gesammelt wurden  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von FormLabs)*

Die Entwicklung eines eigenen Designs, ob nun Open Source oder nicht, und der anschließende Verkauf vorab ausgewählter Komponenten – oder sogar vormontierter und feineingestellter Modelle – ist eine weitere beliebte Methode, den 3D-Druck gewerblich zu nutzen. Hier wird der Markt in naher Zukunft explodieren, wenn 2014 die grundlegenden Patente für mehrere Typen der additiven Fertigung ablaufen werden.



# Auswirkungen des 3D-Drucks auf herkömmliche Geschäftsbereiche

# 7

## *In diesem Kapitel*

- ▶ Die Produktion umwandeln
  - ▶ Gesetze zum geistigen Eigentum anpassen
  - ▶ Auslaufende Patente nutzen
  - ▶ Ethische Kontrollen einführen
- 

**W**ie wir in Kapitel 1 gesehen haben, hat die additive Fertigung ein unglaublich großes umstürzlerisches Potenzial, dass sie eines Tages zu einer dritten industriellen Revolution führen könnte, wobei die lokale Produktion den komplizierten und Ressourcen-lastigen herkömmlichen Fertigungsprozess verdrängen wird. Dieses Kapitel beschreibt die potenziellen Probleme, die aus dieser Entwicklung entstehen – und ihren wahrscheinlichen Einfluss nicht nur auf die herkömmliche Fertigung, sondern auch auf die persönliche, individualisierte Fertigung und sogar auf biologische Bestandteile des menschlichen Körpers.

## *Umwandlung der Fertigung*

Neben der Möglichkeit, nachhaltige alternative Materialien wie beispielsweise PLA anstelle der auf Erdöl basierenden Materialien zu verwenden, könnte die additive Fertigung auch in der Lage sein, Fertigungsaktivitäten umzusiedeln, die derzeit an Standorte ausgelagert sind, an denen eine kostengünstige Massenproduktion stattfindet. Diese Verschiebung wiederum kann sich auf die Industriebereiche auswirken, die am Transport und an der Lagerung von Massenware beteiligt sind – und die Umweltbelastung durch weniger Frachttransport verringern. Die Herstellung in wenig industrialisierten Ländern kann ebenfalls zu einer geringeren Umweltbelastung führen – und die Notwendigkeit von Gesetzesvorschriften überflüssig machen.

Die grundlegenden Technologien hinter der additiven Fertigung können auch dazu führen, dass andere Materialien (in anderen Mengen) für die Fertigung von Waren verwendet werden.

Dies könnte sich auf Branchen auswirken, die derzeit Teile für bestehende Fertigungsstraßen liefern: Sobald wir in der Lage sein werden, eine umweltfreundliche (grüne) Fertigung von Strukturelementen zu realisieren – mit komplexen Innenverbindungen, die mehr an die Flügelknochen von Vögeln erinnern und die nicht mehr aus festen Stahl- oder Aluminiumblöcken



hergestellt werden –, wird eine solche Änderung des Produkts auch eine Änderung des Prozesses nach sich ziehen. Das könnte Folgendes beinhalten:

- ✓ Für dasselbe Ergebnis wird weniger Material benötigt.
- ✓ Recycelte Grundmaterialien können besser wiederverwendet werden.
- ✓ Stärkere, leichtere Produkte werden näher bei ihren Märkten hergestellt.

Die daraus resultierenden Energieeinsparungen würden sich auf die Branchen auswirken, die derzeit Brennstoff und Energie für die herkömmliche Warenfertigung liefern. Das Ergebnis wäre eine umweltfreundlichere Nutzung des sekundären Verbrauchs (durch die möglichen Änderungen sind weniger Ressourcen erforderlich, was kein unmittelbares Ergebnis der Verwendung 3D-gedruckter Produkte ist).

## *Verlagerung der Produktionslinien*

Das Potenzial, das die additive Fertigung nach ihrer weiteren Ausreifung bietet, könnte zu einer grundlegenden Umwandlung bei der Produktion von Sachgütern führen. Die Befürworter sprechen gerne über die Möglichkeiten, die eine unmittelbare personalisierte Fertigung auf Verbraucherebene mit sich bringt, während die Kritiker auf die Nachteile hinweisen, die eine Verschiebung weg von der herkömmlichen Massenproduktion, Lagerung und Verteilung für die vorhandenen Wirtschaftssektoren bedeuten würden. Wer hat Recht? Wir werden in Kapitel 16 Beispiele für möglicherweise problematische Änderungen der herkömmlichen Fertigungsprozesse und der auf der Massenproduktion basierten Wirtschaftsbereiche aufzeigen.

Diese Bedenken haben mit denselben Ängsten zu tun, wie sie die Hersteller von Kutscherspeitschen und Hufschmiede hatten, als aufgrund der Mechanisierung keine Pferdekutschen mehr benötigt wurden, als die Handspinner durch automatisierte Spinnmaschinen ersetzt wurden, als die Schächler die schnelle Produktionskapazität für per Spritzguss geformte Fässer erkannten, oder als die automatisierten Webstühle die Textilproduktion revolutionierten. All dies sind Beispiele für eine vergleichbare Verschiebung, die in früheren Umwandlungsphasen in der ersten und zweiten industriellen Revolution stattgefunden hat.

Die Mobilität der Fertigung, die es gestattet, die Produktion in unmittelbare Nähe zu den Verbrauchern zu bringen, lässt die Notwendigkeit wegfallen, Massenartikel in einer Massenproduktion herzustellen, die brennstoffintensiv transportiert und gelagert werden müssen, nachdem die Spitzenzeit der Ölförderung in zehn Jahren bereits überschritten sein wird. Mit der Möglichkeit, alles direkt am Kundenstandort zu entwickeln und herzustellen, von Motorteilen bis hin zu ganzen Häusern, können viele Frachtschiffe außer Betrieb genommen werden, wenn die »Industrielle 3D-Revolution« Fahrt aufnimmt und nur einen Bruchteil des versprochenen Potenzials umsetzt.

Der 3D-Druck, Crowdfunding, Robotik, Ad-hoc-Medieninhalte und zahlreiche andere Technologien werden in ihrer Kombination nicht nur den Verlauf der Produktion verändern,

sondern auch die herkömmlichen Fertigungsverfahren und die zugehörigen Industriebereiche grundlegend ändern, wie beispielsweise Werbung und Marketing.

Wenn Sie die Möglichkeit betrachten, ganze Häuser sowie ihre Einrichtung zu drucken, erkennen Sie, wie sich dieser Wandel auch auf ganz grundlegende Dinge auswirken wird, wie beispielsweise Industriebereiche, die derzeit Umzüge transportieren und zwischenlagern. Im Extremfall wird am neuen Standort einfach alles neu hergestellt. Dasselbe Unternehmen könnte die Materialien aus dem alten Haus und seiner Einrichtung übernehmen – woraus sich gewissermaßen ein vollständiges Recycling ergibt, das sich auf alle Industriebereiche auswirkt, die derzeit Waren lagern oder Möbel in neue Häuser transportieren.

Analog dazu gäbe es Auswirkung auf Händler, die derzeit das neue Haus bauen und die Möbel lagern, bevor sie Kunden neue Modelle verkaufen, ebenso wie auf Unternehmen, die das Eigentum bis zum Übergang auf einen neuen Eigentümer verwalten, bis hin zu den Hausmeisterdiensten, die sich um ein Haus kümmern, solange niemand darin wohnt. Die neue Art, Geschäfte zu machen, wird die herkömmlichen Vorgänge in allen Industriebereichen maßgeblich verändern, aber auch völlig neue Gelegenheiten für Kunden und Produzenten in dem neuen Industriezeitalter schaffen.

Viele der weltweit größten Wirtschaftsmächte werden angesichts dieser neuesten, dritten industriellen Revolution verdrängt werden und natürlich versuchen, diesen Wandel so lange wie möglich hinauszuzögern. Diese Ablehnung ist erkennbar in den Bestrebungen, dass alle 3D-Drucker bei der Regierung gemeldet werden sollten, weil von ihnen die Gefahr ausgehe, dass darauf Waffen oder fehlerhaft produzierte Komponenten angefertigt werden könnten, die zu furchtbaren Verletzungen oder Tod führen könnten.

Die Kontrolle dieser Technologie ist jedoch nicht so einfach. Mithilfe der RepRap-Plattform beispielsweise können Objekte unter Verwendung der unterschiedlichsten Materialien hergestellt werden. Die Studenten von Kirk konnten zum Beispiel funktionierende 3D-Drucker aus Ausschussteilen aus dem Elektronikschrott bauen (Schrittmotoren, Schalter und Schienen aus alten Tintenstrahldruckern, Elektronik aus den Arduino-Mikrocontrollerkarten auf Chip-Ebene und Open Source-Designs von RAMPS-Motorantrieben). Und PLA-Fäden wurden bereits erfolgreich aus Maniok hergestellt. Wenn der Bau von 3D-Druckern mit Abfall und pflanzlichen Rohstoffen möglich ist, wird eine Registrierung und Kontrolle dieser bemerkenswerten Technologie sicherlich schwierig, wenn nicht gar unmöglich.

In medizinischen und technischen Umgebungen ist der Erfolg der additiven Fertigung bereits weitgehend erwiesen. Denken Sie nur an die wunderbare Rekonstruktion der riesigen Saturn V-Raketenmotoren, die die Wissenschaftler der NASA herstellen konnten. Diese Technologie wurde darauf ausgelegt, die Schwerlastkapazität für den Orion-Weltraumbahnhof bereitzustellen, der das alte Space-Shuttle für die bemannte Erkundung von Mond und Mars ersetzen wird. Mit dem 3D-Druck werden die Fahrzeuge vorbereitet, die unsere zukünftigen Astronauten transportieren, und der 3D-Druck wird sie mit den Werkzeugen und möglicherweise sogar mit den Lebensmitteln ausstatten, die sie während ihrer Reisen brauchen. In der Medizin kann der 3D-Druck schon bald Ersatzteile für unseren Körper liefern. Und im militärischen Bereich gibt es zahlreiche Verwendungszwecke für vor Ort erstellte schnelle Prototypen aus dem 3D-Drucker. Der Versuch, diesen Flaschengeist wieder in seine Schranken zu verweisen, wird fast unmöglich sein, wenn man die enorme globale Reichweite der Erfinder betrachtet,

die immer leistungsfähigere Lösungen entwickeln, um die Kapazität zu erweitern, die die additive Fertigung bietet.

Der weitere Weg wird jedoch nicht einfach sein. Viele Menschen wollen, dass die Dinge so bleiben, wie sie immer waren. Aber die industriellen Revolutionen der Vergangenheit haben gezeigt, dass sich letztlich immer die einfacheren, kostengünstigeren und effizienteren Lösungen durchsetzen. Wahrscheinlich werden zukünftige Generationen über uns sprechen, wie wir heutzutage über John Henry sprechen, oder man wird im Biologieunterricht Geschichten aus der Zeit hören, als es noch nicht möglich war, Ersatzorgane zu produzieren, und man wird sich fragen, wie wir ohne all die Dinge leben konnten, die sie für selbstverständlich erachten.

### *Verkürzung der Fertigungskette*

Für die herkömmliche Fertigung ist eine Abfolge von Ereignissen erforderlich, die an verteilten Standorten stattfinden müssen. Betrachten wir das Ganze am Beispiel eines Lithiumakkus für ein Mobiltelefon:

1. Abbau der benötigten Rohstoffe, wie beispielsweise Eisen und Lithium.
2. Transport der Rohstoffe an Standorte, wo die Materialien für einzelne Komponenten hergestellt werden können, wie beispielsweise Stahl oder Lithium-Verbundstoffe.
3. Transport der Materialien an Standorte, wo sie zu Unterbaugruppen verarbeitet und fertiggestellt werden, wie beispielsweise Akkus.
4. Transport der Unterbaugruppen an Standorte, wo die Endprodukte hergestellt werden, wie beispielsweise Mobiltelefone.
5. Transport des Endprodukts zur Verpackung für den Verbraucher.
6. Transport des verpackten Produkts an die Verbraucherstandorte, die häufig international verteilt sein können.

Wenn Sie also das nächste Mobiltelefon in einem Geschäft in Ihrer Nähe kaufen, stehen Sie am Ende einer langen Ereignisabfolge. Für ein Produkt, das unter Einsatz der additiven Fertigung produziert wurde, sieht der Fertigungszyklus anders aus:

1. Abbau der benötigten Rohstoffe.
2. Herstellung der erforderlichen Materialien aus den abgebauten Rohstoffen.
3. Transport der Materialien an einen Produktionsstandort in einer Stadt oder einer Region.
4. Auswahl individueller Produktoptionen durch den Kunden vor der Herstellung.
5. Verwendung der Datendateien, die das Produktdesign definieren, um ein spezifisches Modell des Endprodukts herzustellen, das die gewählten Optionen aufweist.

Darüber hinaus würde das Recycling früherer Produkte als Grundstoff für die Herstellung komplexer neuer Designs aus mehreren Materialien die Kosten für die Verbraucher reduzieren und die Verschwendung von Material minimieren, das andernfalls irgendwo auf der Müllhalde oder in der Verbrennung landen würde.

### *Lokale Fertigung*

Einige Waren, wie beispielsweise Kleiderhaken oder Kinderspielzeug, können bereits ganz einfach unter Verwendung eines 3D-Druckers der Verbraucherklasse zuhause angefertigt werden. Geht man durch die Einkaufspassagen, sieht man zahlreiche andere Produkte, die heute zuhause hergestellt werden können – Kunststoffbrillen, Schmuckkästchen oder Handygehäuse. Und weil Sie diese Dinge weitgehend anpassen können, wenn Sie sie zuhause anfertigen, entstehen dabei sehr viel mehr Varianten, als die jeweils neuesten Standardmodelle.

Die Forschung hat bereits gezeigt, dass durch den individuellen Einsatz von 3D-Druckern der Verbraucherklasse Tausende von Euros eingespart werden können, wenn kleine Kunststoffgegenstände zuhause hergestellt werden. Für Dinge, die länger halten sollen oder komplexer sind, scheint eine spezielle Fertigungseinrichtung erforderlich zu sein, die spezielle und teurere Materialien verarbeiten kann und eine hochwertigere Ausrüstung für die additive Fertigung besitzt. In den USA entwickelt UPS (United Parcel Service) gerade entsprechende Services für die additive Fertigung, die in ihren Zentren bereitgestellt werden sollen. Die Idee dabei ist, Dinge vor Ort herzustellen und sie dann an die Kunden weiterzugeben, ohne dass eine herkömmliche Fertigung oder Lieferketten erforderlich sind. Das US-amerikanische Militär entwickelt Zentren für die additive Fertigung, die in Schiffskontainern passen, sodass sie zur Unterstützung der Truppen an die Front geschickt werden können. Bald werden wir zahlreiche mobile Fertigungszentren sehen, die vor allen möglichen Veranstaltungen anreisen, um personalisierte Gegenstände für den Verkauf herzustellen, oder die in Gegenden gebracht werden, wo nach einer Naturkatastrophe eine Wiederherstellung erforderlich ist.

Momentan untersuchen Forscher, wie natürliche Materialien verwendet werden können, um genau für diese Zwecke Unterkünfte anzufertigen. Markus Kayser am MIT hat seinen Solar Sinter gebaut, um das überall vorhandene Sonnenlicht und den Natursand in Ägypten zu nutzen, um dauerhaft haltbare Gegenstände und Prototypstrukturen herzustellen. Die NASA und die ESA erforschen automatisierte Systeme, die Unterkünfte auf dem Mond produzieren – aber dieselben Technologien können genauso einfach auch auf der Erde eingesetzt werden, weil diese Modelle fast nichts kosten, wenn sie von einem Computer auf den anderen übertragen werden.

### *Wegfall traditioneller Freigabezyklen*

Weltweit bedeutet der Jahreszeitenwechsel ändert sich der Zyklus für Waren, die für kaltes oder warmes Wetter geeignet sind. Analog dazu starten große Unternehmen massive Marketing-Bemühungen, um jedes Jahr neue Modelle eigentlich dauerhafter Waren auf den

Markt zu bringen. Das stellte einen kontinuierlichen Umsatz sicher und hält die Fertigungseinrichtungen am Laufen. Einige Zyklen bringen eine echte Verbesserung mit sich, ebenso wie Innovationen gegenüber vorherigen Modellen. Andere sind rein kosmetischer Natur und stellen keine wirkliche Verbesserung dar. Außerdem gibt es irgendwann kaum noch Ersatzteile, die zudem sehr teuer sind. Bei Autos zeigt sich dieser Trend schon seit vielen Jahren. Beispielsweise sind Bauteile für einen alten Kombi wie beispielsweise den Willis Jeep aus dem zweiten Weltkrieg immer seltener zu haben, außer bei speziellen Händlern, die astronomische Preise verlangen, weil die Teile so speziell sind.

Durch die additive Fertigung kann ein Referenzmodell für jede Komponente entwickelt werden (oder aus ursprünglichen Fertigungszeichnungen übernommen werden), sodass auch für ein 50 Jahre altes Auto problemlos Ersatzteile hergestellt werden können, und kein Umstieg auf ein neueres Modell erforderlich ist. Die Kunden könnten für die 3D-gedruckten Ersatzteile neue Funktionen spezifizieren, um aktuelle Innovationen zu berücksichtigen, die auch für ältere Modelle gelten werden. Dies bedroht die Hersteller von Gebrauchsgütern, weil damit die Notwendigkeit wegfällt, ein neues Modell zu kaufen, wenn es irgendwann keine Ersatzteile mehr gibt. Der kontinuierliche Umsatzstrom wird damit unterbrochen, den man anhand der geplanten Veralterung von Komponenten erzielen konnte, da man durch Verschleiß und Korrosion die Lebensdauer eines Produkts zeitlich einschätzen kann. Ein Ersatzteil, das durch additive Fertigung erstellt wird, kann (zum Beispiel) ganz einfach Aluminium- oder Messingkomponenten durch Versionen aus Wolfram ersetzen, die jahrzehntelang halten und nur einen minimalen Verschleiß aufweisen.

Die Hersteller könnten sich natürlich auch einfach weigern, ihre 3D-Modelle für Ersatzteile bereitzustellen, um eine künstliche Knappheit zu schaffen, es ist aber bereits möglich, verschlissene Teile zu scannen, sie nach Bedarf zu stärken oder anzupassen, und sie direkt auszudrucken, ohne das Originaldesign dafür zu benötigen. Dieses Konzept sollte bald völlig selbstverständlich sein, aber die Nachfrage nach Rohmaterial, um diese stärkeren Teile aus Titan oder Wolfram zu bauen, könnte die Märkte der Zukunft beeinflussen. Einige Kunden bevorzugen möglicherweise ein kostengünstiges Kunststoff- oder recyceltes Aluminiumteil statt eines wirklich langlebigen Äquivalents, um dieses Titan für andere Zwecke nutzen zu können.

## *Probleme mit dem geistigen Eigentum*

Alles eine Frage der Perspektive: Ganz allgemein scheint es eine gute Idee zu sein, die Herstellung wieder an die Orte zu verlegen, wo die Produkte verbraucht werden, wenn man von der industrialisierten Welt ausgeht. Die Menschen in den Entwicklungsländern, wo die Beschäftigung auf einer Billigproduktion in der herkömmlichen Weise basiert, sehen sich dadurch aber in ihrer Existenz bedroht. Und auch die Bedrohung der Rechte auf geistiges Eigentum und seinen Schutz führen zu zahlreichen Kritikpunkten – insbesondere bei denen, deren Einkommen vom geistigen Eigentum abhängig ist. Wenn Sie darauf angewiesen sind, dass Ihre Ideen, Kreationen oder Designs – oder die von anderen – nicht einfach nachgemacht werden, werden Sie diese Bedrohung sehr ernst nehmen.

## Bedrohter Schutz des geistigen Eigentums

Die USA, die EU und andere Mitglieder der WIPO (World Intellectual Property Organization) bieten gesetzlichen Schutz unter Patenten sowohl für den *Gebrauch* (Funktionalität) als auch für das *Design* (Dekor eines funktionalen Produkts). Dieser Schutz wird für einen bestimmten Zeitraum ab dem Zeitpunkt der Ausstellung gewährt. Innerhalb dieser Laufzeit können Designer die nicht lizenzierte Nutzung ihrer registrierten Designs für verkäufliche Produkte verhindern. Die Hersteller müssen eine Lizenzgebühr zahlen.



Aktuelle US-amerikanische Gebrauchspatente entsprechen denjenigen der WIPO und der WTO (World Trade Organization) gemäß der TRIPS-Vereinbarung (Trade-Related Aspects of Intellectual Property Rights): Es gilt ein 20 Jahre andauernder Schutz ab dem Datum der Anmeldung, vorausgesetzt, bestimmte Gebühren werden ordnungsgemäß bezahlt. Designpatente beziehen sich nur auf das Dekor des Produkts und sind nur für 14 Jahre geschützt. Sie können außer Kraft gesetzt werden, wenn das Design eine funktionale Komponente darstellt (zum Beispiel könnte ein Kronleuchter, der wie ein Zahnrad geformt ist, seinen Schutz unter dem Designpatent verlieren, weil die Funktion des Zahnrads von einem anderen Gebrauchspatent geschützt ist, oder weil es einfach schon zuvor als Stand der Technik existiert hat).

Designpatente bieten einen Schutz gegen die Nachahmung der physischen Form eines bestimmten Objekts, aber sie sollen auch den Wettbewerb inspirieren, indem die Entwicklung abgeleiteter Designs angeregt wird, die wiederum selbst patentiert werden können. Und die Erteilung eines Patents fordert, dass die Arbeit ursprünglich und nicht offensichtlich ist. Exemplare früherer Designs können also einen Designanspruch ungültig machen, wenn gezeigt wird, dass das Design bereits öffentlich genutzt wird, oder *bereits als Stand der Technik existierte*. Dafür reichen ein Foto oder eine Maßstabszeichnung, die dasselbe Design beschreiben.

Physische Designs wie beispielsweise der Alien-Cube aus dem Film *Super 8* oder andere nicht-funktionale Filmrequisiten (zum Beispiel das preisgekrönte Modell des Oscillation Overthrusters aus dem Film *Buckaroo Banzai*, das später in zahlreichen TV-Episoden von *Star Trek* verwendet wurde, siehe Abbildung 7.1) können ebenfalls unter einem Copyright geschützt werden, wobei nicht-funktionale Designs davor geschützt werden, kopiert und verkauft zu werden, um ihren künstlerischen Wert zu schützen. Die Schwierigkeit für Besitzer von geistigem Eigentum ist, dass solche Designs einfach anhand von Fotos kopiert werden können (siehe Abbildung 7.2), die aus der Entfernung aufgenommen werden können, ohne dass der Eigentümer überhaupt bemerkt, dass sein Design dupliziert wird.

Dies stellt eine Herausforderung beispielsweise für die Hersteller dar, deren neues Karosseriedesign für ein neues Auto von einem Fotografen aufgenommen, an eine Fertigungseinrichtung übertragen und als 3D-gedrucktes Overlay für das letztjährige Modell bereitgestellt werden könnte, noch bevor die neue Version in den Ausstellungsräumen des Herstellers zum Verkauf angeboten wird. Natürlich will ich keine Kopien meines kopierten Requisitenmodells verkaufen, aber findige Anbieter bringen minimale Änderungen an Produkten an, um gewerblich nutzbare Varianten zu schaffen, die den patentierten Designs sehr, sehr nahekommen.





Abbildung 7.1: Harzmodell eines Filmrequisits aus Star Trek und Buckaroo Banzai, sowie zwei kleinere 3D-gedruckte Kopien

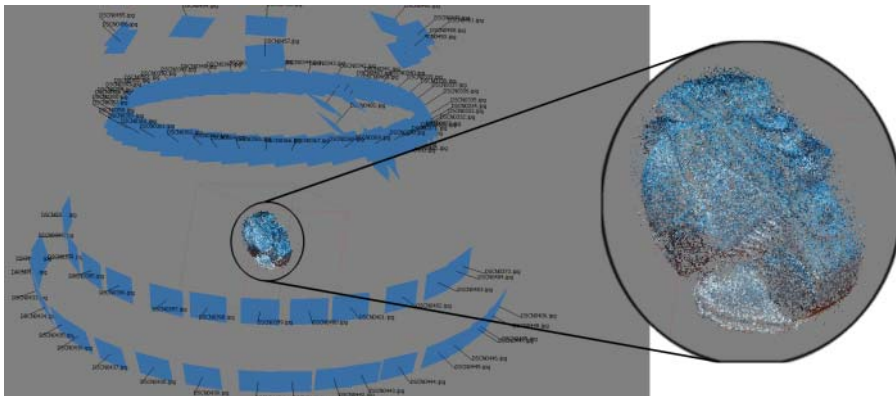


Abbildung 7.2: Aufnahme eines 3D-Modells einer Filmrequisite unter Verwendung einer kostenlosen Fotogrammetrie und mehreren Fotos. Es wurde keine spezielle Ausrüstung für das Abscannen verwendet

Weil die additive Fertigung jedem Benutzer gestattet, patentierte Designs zu kopieren oder neue Produkte mit dem »Look & Feel« eines patentierten Designs zu schaffen, müssen die aktuellen Patentrechte überarbeitet werden. Bis sich die Gesetze ändern, wird die Technologie jedoch weiterhin Probleme machen. Das in Abbildung 7.3 gezeigte Kunststoffmodell eines Panzers beispielsweise ist das persönliche Design von Thomas Valenty für ein Modell des Brettspiels Warhammer, das ursprünglich von Games Workshop erstellt wurde. Dabei handelt es sich nicht um eine direkte Kopie eines vorhandenen Modells, sondern es wurde mit einem ähnlichen »Look&Feel« entworfen. Die Onlineveröffentlichung des Modells durch Valenty



führte zu einer Klage von Games Workshop, worin geltend gemacht wurde, dass die 3D-Modelldatei von Valenty die Rechte auf geistiges Eigentum verletzen (das heißt, wenn jemand das Design von Valenty herunterlädt, dann muss er nicht das offizielle Produkt von Games Workshop kaufen). Das Thingiverse-Verzeichnis erhielt eine Abmahnung auf Grundlage des Schutzes unter dem DMCA (Digital Millennium Copyright Act), besser bekannt vom illegalen File-Sharing für Musik- und Videodateien. Diese Abmahnung sollte die Möglichkeit verhindern, dass jemand eine Kopie des Designs hätte herunterladen könne – nicht das physische Objekt, sondern nur seine virtuelle Darstellung –, die dann hätte genutzt werden können, um ein Objekt für den persönlichen Gebrauch herzustellen.



Abbildung 7.3: 3D-gedruckte Kopie des selbst entworfenen Spielzeugpanzermodells für das Spiel Warhammer von Thomas Valenty

### Übertragung der gesetzlichen Haftung

Zum Zeitpunkt der Drucklegung dieses Buches können Einzelpersonen immer noch Elemente für ihren Eigengebrauch herstellen, ohne einen Rechtsanwalt beauftragen zu müssen, der nach allen Eintragungen von Rechten auf geistiges Eigentum sucht, um alle potenziellen Konflikte zu identifizieren. Das gilt für patentierte Designs. Sie können Ihr eigenes Betriebssystem schreiben, das aussieht wie ein bekanntes gewerblich angebotenes Design, solange Sie es nicht an andere weitergeben. Oder Sie können die geschützte Form einer Limonadenflasche für Ihren persönlichen Gebrauch zuhause nachbilden. Aber nachdem nun auch jedermann ohne nennenswerte Designkompetenz zuhause ein Ersatzteil für ein älteres Auto herstellen kann, das vielleicht noch als geistiges Eigentum geschützt ist, gibt es plötzlich Probleme. Das Rechtssystem versucht, Möglichkeiten zu finden, wie das Recht des Designers geschützt werden kann, einen Gewinn aus seinen Designs zu machen, und wie die Rechte von Einzelpersonen geschützt werden können, eigene, persönliche Produkte anzufertigen, ohne dass enorme Kosten anfallen und eine gesetzliche Überprüfung notwendig ist. Dasselbe gilt für die Designs möglicherweise gefährlicher Werkzeuge und Waffen. Die Frage ist, wann der persönliche Gebrauch überschritten ist.



Wenn eine Komponente oder ein anderes Produkt nicht ordnungsgemäß funktionieren, erfolgen in der Welt der traditionellen Fertigung häufig Rückrufe und Austauschaktionen. Verbraucher, die unveränderte Kopien solcher Elemente herstellen, übernehmen unwissentlich die Haftung für Schaden oder Verletzungen, die aus ihrem Gebrauch resultieren. Wenn Sie irgendwann in den nächsten Jahren einen 3D-gedruckten Staubsauger verwenden, der an einem Standort hergestellt wurde, wie es beispielsweise UPS in Aussicht stellt, und der Griff bricht ab und Sie verletzen sich, wer ist dann dafür rechtlich haftbar? Ist es ein Fehler des ursprünglichen Designers? Ist es der Fehler des Herstellers, der möglicherweise andere Materialien verwendet hat? Ist es der Fehler des Besitzers, der für das Ersatzteil gezahlt hat und nicht wusste, ob es sich um ein offizielles Originalersatzteil gehandelt hat? Unsere herkömmlichen Versicherungen und andere rechtliche Vorgaben für die Haftung werden in den kommenden Jahren überarbeitet werden müssen, um die erstaunlichen Neuerungen zu berücksichtigen, die auf uns zukommen.

### Nutzung abgelaufener Patente

Patente schützen Designs für mehrere Jahre, aber was passiert, wenn sie ablaufen? So alte Dinge werden nicht mehr durch Gesetze zum geistigen Eigentum geschützt, um ihre Nachbildung zu verhindern. Dinge, die älter als die Patentlaufzeit sind – oder deren Patent freigegeben wurde, weil erkannt wurde, dass es bereits zuvor entsprechende Designs gegeben hat, oder weil die Gebühren nicht bezahlt wurden –, können von jedem Hersteller nachgebaut und zum Verkauf angeboten werden. Momentan stellt das USPTO (United States Patent Office) verschiedene 3D-druckbare Objekte bereit – dank eines Rechtsanwalts, Martin Galese, der abgelaufene Patente in 3D-druckbare Objekte umgewandelt hat, die Sie über Thingiverse herunterladen können, um sie selbst auszudrucken oder bei seinem Onlineshop bei Shapeways zu bestellen. Abbildung 7.4 zeigt zwei seiner Designs: eine Blumenvase von 1895 (US-Patent Nr. 165.456 von Samuel Vanstone) und einen Uhrständer von 1979 (US-Patent Nr. 4.293.943 von Victor Avery).

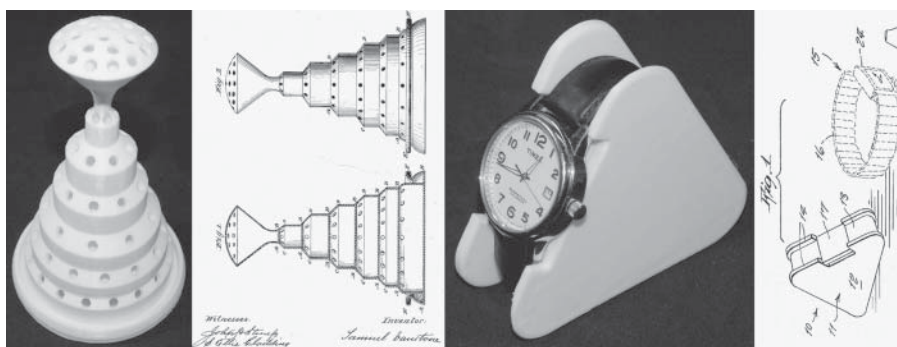


Abbildung 7.4: Zwei der Designs von Martin Galese – eine Blumenvase und ein Uhrständer –, die er nach abgelaufenen Patenten erstellt hat

Derzeit verfügt das US Patent Office über Zeichnungen aus über 8 Millionen Patenten, die seit dem Erlass des Patentgesetzes 1790 erteilt wurden, das den Bürgern gestattete, ein Patent anzumelden. Die meisten dieser Patente sind bereits abgelaufen und dürfen reproduziert werden. Und es gibt auf der ganzen Welt vergleichbare Pools mit Designs, die als abgelaufenes geistiges Eigentum zu betrachten sind. Wenn die aktuellen Gesetze beibehalten werden, kann nichts ein Unternehmen daran hindern, sich beliebig viele davon anzueignen und 3D-gedruckte Reproduktionen zum Verkauf herzustellen. Wenn die Dateien, die 3D-Modelle von Designs definieren, unter dem *Copyright*-Gesetz statt unter dem Patentgesetz geschützt werden, könnte ihre Wiederverwendung für Jahrhunderte verzögert werden. (Der Copyright-Schutz bleibt bis 70 Jahre nach dem Tod des Autors bestehen; die Fortschritte in der Altenpflege und neue medizinische Verfahren können das menschliche Leben weit über die 100-Jahre-Marke verlängern, noch bevor der 70-Jahre-Countdown beginnt.)

Seltene Dinge sind nur deshalb selten, weil sie nicht mehr hergestellt werden. Verständlicherweise wollen Sammler seltener Dinge ihre Investitionen schützen und sicherstellen, dass sie nicht nachgebaut werden. Vor Kurzem wurde ein Plymouth Hemi-Cuda original ab Werk für 2 Millionen Dollar zum Verkauf angeboten. Gäbe es einen 3D-gedruckten 71er Cuda, würden die Sammler mit Sicherheit versuchen, einen solchen zu drucken. Die Eigentümer der wenigen verbleibenden Originalfahrzeuge würden jedoch ihre Investitionen bedroht sehen, wenn jemand die ursprünglich dem Copyright unterliegenden Designs für diese atemberaubend schönen Fahrzeuge übernehmen und dann beginnen würde, 3D-gedruckte Kopien davon anzufertigen, weil der Patentschutz für dieses geistige Eigentum seit Langem abgelaufen ist.

### *Innovationen in Bezug auf geistiges Eigentum*

Die additive Fertigung steckt noch in ihren Kinderschuhen – und viele der Designs für die schnellen Fertigungsmaschinen selbst stehen noch unter Patentschutz. Der Ablauf von Patenten von zwei der frühen Modellertechniken – Stereolithografie und Schmelzschichtung – haben den Weg zur Entwicklung der zahlreichen als Open Source bereitgestellten RepRap-Varianten geöffnet, ebenso wie zur neuen individuellen Fertigung von Verbraucherdruckern, wie des Form 1. Grundlegende Patente zur laser-gesinterten Granulatkleber-Fertigung werden 2014 ablaufen. Diese und andere ablaufende Patente werden das Potenzial für neue gewerbliche und private Systeme maßgeblich steigern. Irgendwann fallen damit die Preise für 3D-gedruckte Objekte aus Metall und anderen Materialien – wodurch wieder völlig neue Möglichkeiten entstehen, solche Objekte herzustellen und zu nutzen.

Nicht alle Gesetze zum geistigen Eigentum konnten jedoch die Schleusentore geschlossen halten – letztlich hat gerade der Patentschutz neue Entwicklungen im Bereich des 3D-Drucks angeregt. Daraus ergeben sich völlig neue Gelegenheiten. Nachdem (beispielsweise) 3D Systems alle Produktionsrechte für die stereolithografische Fertigung besitzt, hat ein anderes Unternehmen alternative Möglichkeiten entwickelt, die Fotopolymerisierung einzusetzen, ohne einen Flüssigkeitspool zu benötigen, um das aufzubauende Objekt herzustellen.

Objet (heute fusioniert mit Stratasys) hat die neue Fotopolymertechnologie PolyJet entwickelt, ähnlich dem Tintenstrahldruck, die den Auftrag dünner Schichten von Flüssigkunststoff nutzt, der schnell mit UV-Licht gehärtet werden kann.

Dieser Fotopolymerprozess ist sehr viel einfacher zu handhaben, und für die SLA-Produktion werden nicht mehr so große Mengen Flüssigkunststoff benötigt. Aber letztlich hat jede Technologie ihre Vorteile. Während einige der größten und präzisesten 3D-Drucker Varianten der stereolithografischen Fertigung und die Multi-Photonen-Lithografie einsetzen, wie in Kapitel 2 gezeigt, gestattet die PolyJet-Alternative die Mischung unterschiedlicher Flüssigkunststoffe. Der Prozess ist vergleichbar damit, wie 2D-Drucker farbige Tinten mischen, um Farbfotos auszudrucken. Die Drucker von Objet können damit Objekte erzeugen, deren physische Eigenschaften sich von einem Punkt zum nächsten verändern können, selbst innerhalb des gesamten Objekts, um beispielsweise Flexibilität in einem Bereich und eine Oberfläche mit höherer Reibung in einem anderen zu schaffen, oder Variationen im Hinblick auf Transparenz und Farbe aus ästhetischen oder funktionalen Gründen.

### *Schutz der Rechte auf geistiges Eigentum*

Wenn die Firma 3D Systems durch den Besitz der ursprünglichen SLA-Patente nicht eine Hürde geschaffen hätte, wäre die Alternative von PolyJet vielleicht gar nicht entwickelt worden. Sobald die ersten Technologien der additiven Fertigung nicht mehr durch Patente geschützt sein werden, werden neue Möglichkeiten entstehen, die Fertigung umzuwandeln und völlig neue Produkte zu erschaffen.

Wie in der Musik- und Filmindustrie bedeuten neue Technologien immer eine Bedrohung für das geistige Eigentum etablierter Unternehmen. Es gibt bereits Pläne, eine Art Digital Rights Management (DRM) einzusetzen, um zu kontrollieren, welche Materialtypen für bestimmte 3D-Modelle verwendet werden dürfen (zum Beispiel Kunststoff und Glas, aber nicht Metall), oder um die Anzahl der aus einer 3D-Designdatei gefertigten Kopien einzuschränken. Solange es jedoch selbstgebaute 3D-Drucker gibt, werden wahrscheinlich keine wirksamen DRM-Regelungen für private Fertigungssysteme durchsetzbar sein. Gewerbliche Anbieter könnten gezwungen werden, konform zu einer Art DRM-Lösung zu handeln, wobei jedes Modell anhand komplizierter Algorithmen überprüft wird, um festzustellen, ob es das geistige Eigentum eines anderen verletzt oder Dinge enthält, deren Herstellung beschränkt ist.

Um dies zu ermöglichen, muss jedoch zuvor eine Datenbank aller geschützten Designs angelegt werden – und man braucht eine Suchmaschine, die mit der Software eines 3D-Druckers verbunden werden kann, um die Herstellung eines bestimmten Designs zuzulassen oder zu verhindern. Es ist anzunehmen, dass es zu möglichen Angriffen von den Befürwortern der Open Source-Strategie kommen wird. Darüber hinaus wird ein Betreiber auch schwerlich daran gehindert werden können, die Vorgaben des Designers im Hinblick auf das Material zu umgehen, das verwendet werden darf. Beispielsweise könnte er eine Kartusche mit Aluminiumpulver durch eine Kartusche mit Goldpulver ersetzen – unabhängig davon, ob der Designer je eine massive Goldversion des Objekts vorgesehen hat.

### *Ethische Kontrollen*

Einige Objekte sind durch die Art ihrer Verwendung geschützt, wie beispielsweise Feuerwaffen oder Hochsicherheitsschlüssel für Handschellen oder andere geschützte Schlösser.

Neue Systeme versprechen einen Schutz gegen die Herstellung 3D-druckbarer Feuerwaffen zu bieten, indem charakteristische Komponenten erkannt werden, die problematisch sein könnten. Beispielsweise wird die Herstellung von Röhren mit 9 mm oder 10 mm oder anderen Kalibern von Feuerwaffen blockiert. Wie für DRM gilt jedoch, dass es bei selbst gebauten 3D-Druckern ganz einfach sein wird, Softwarekontrollen zu umgehen, um die Herstellung geschützter Designs zuzulassen.

Abbildung 7.5 zeigt den Liberator, die erste funktionale Feuerwaffe aus dem 3D-Drucker. (Beachten Sie, dass wir die Feuerwaffe gegenüber den ursprünglichen Designdateien verändert haben, um sie zur Demonstration zur Verfügung zu stellen – ihre Funktionen sind alle deaktiviert.) Diese Waffen stellen ein Problem für die Exekutive dar, weil ihr Design zwar so ausgelegt ist, dass es konform zu den aktuellen US-amerikanischen Gesetzen für legale Feuerwaffen ist, sie aber so abgeändert werden können, dass sie von den aktuellen Sicherheitsscannern nicht erkannt werden.

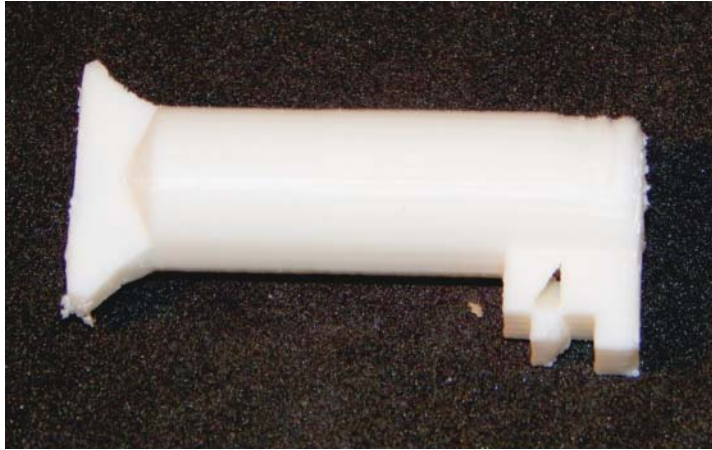


*Abbildung 7.5: Die 3D-gedruckte Feuerwaffe Liberator nach Abänderung zur Schulung der Exekutivbeamten als nicht-funktionales Modell*

Neben den 3D-gedruckten Waffen können auch andere kontrollierte Designs erstellt werden, wie beispielsweise Hochsicherheitsschlüssel für Handschellen oder andere Sicherheitsschlösser (siehe Abbildung 7.6). Diese funktionalen Schlüssel sind aus Kunststoff hergestellt, weshalb sie ganz einfach von Kriminellen durch Sicherheitsschranken mit Metalldetektor geschleust werden können. Die Studenten am MIT haben vor Kurzem auf dem 3D-Drucker ausdrückbare Modelle der kontrollierten Schlüsselrohlinge für die Hochsicherheitsschlösser Primus von Schrade gedruckt. Die noch nicht gefrästen Schlüsselrohlinge können von der Zivilbevölkerung normalerweise nicht gekauft werden. Forscher konnten echte Schlüssel nach Fotos nachmachen, die aus einer Entfernung von bis zu 60 m aufgenommen wurden. Sie brauchten einfach nur die Rohlinge, um vollfunktionale Schlüssel anzufertigen, um die Sicherheitsvorkehrungen von Regierungs-, Gesundheits- und Hafteinrichtungen zu umgehen.

Wenn es irgendwann 3D-druckbare Drogen oder 3D-druckbare Körpergewebe oder Organe geben wird, werden wir auch ethische Probleme mit dieser neuen Form der Fertigung

bekommen. Bisher hatten wir Probleme mit Sportlern, die illegale Dopingmittel einnahmen, aber bald werden wir Möglichkeiten finden müssen, um spezifische Veränderungen des Körpers von Athleten zu erkennen, die ihnen zu Extremleistungen verhelfen.



*Abbildung 7.6: Ein 3D-gedruckter Hochsicherheitsschlüssel für die Handschellen der deutschen Polizei*

Software alleine ist keine Lösung, um die ethische oder nicht ethische Verwendung von Produkten zu regeln. Dinge, die bisher einfach nicht realisierbar waren, wird es in Zukunft geben. Im Medizinbereich wird es in wenigen Jahrzehnten 3D-gedrucktes Gewebe für die rekonstruierende Chirurgie oder medizinische Behandlungen geben. Gesetzliche Kontrollen anhand von Patenten stehen bereits jetzt großen Herausforderungen gegenüber, wenn es um biologische Organismen geht. Digital hergestellte Viren könnten jederzeit auftauchen und würden ein völlig neues Problemspektrum im Hinblick auf Anwendung, Haftung und gesetzliche Kontrollen darstellen.



# 3D-Druck – Forschungsübersicht



## *In diesem Kapitel*

- ▶ Grundlegende Technologien entwickeln
- ▶ Funktionale Designs erstellen
- ▶ Die Materialauswahl erweitern
- ▶ Lange Reisen ins Weltall ausstatten
- ▶ Medizinische Fortschritte schaffen

---

**E**nige Anwendungen der additiven Fertigung deuten bereits auf ein maßgebliches Umwandlungspotenzial in vielen verschiedenen Bereichen der Fertigung und Produktion hin. Das wahre Potenzial der Technologie ist allerdings noch lange nicht in allen Bereichen entdeckt. Die Forschung arbeitet weiter an Anwendungen, wie virtuelle elektronische Modelle unterschiedlichster Art in die Realität umgewandelt werden können. In diesem Kapitel geht es um aktuelle Forschungsarbeiten zu Techniken, Materialien und Technologien der nächsten Generation.

## *Grundlegende Technologien*

Neue Entwicklungen brauchen Zeit, bis sie ausgereift sind. Die Entdeckung, dass man Magnetismus steuern kann, indem man ein elektrisches Feld durch eine Drahtschleife schiebt, hat völlig neue Möglichkeiten für die Elektrik und Elektronik geschaffen – und diese wiederum haben zur Entwicklung von Computern, Mobiltelefonen und anderen Errungenschaften der modernen Welt geführt. Die Automatisierung hat einen Wandel der Fertigung mit sich gebracht. Heute können wir durch die Kombination aus Computern, Robotik und vielen anderen Disziplinen ganz einfach zuhause kleine Gegenstände aus Kunststoff herstellen, so wie wir früher Kochrezepte auf unseren Tintenstrahl- und Laserdruckern ausgedruckt haben. Wenn die Forscher erst noch mehr Funktionen für 3D-Drucker entwickelt haben werden, werden sie neue Werkzeuge schaffen, die uns Möglichkeiten eröffnen, die wir uns heute noch gar nicht vorstellen können. Über ein paar von ihnen können wir jedoch schon heute nachdenken.

## *Werkzeuge für den Unterricht*

Jedes neue Werkzeug bringt erst dann vollen Nutzen, wenn der Anwender des Werkzeugs richtig geschult wurde. Lehrer können also die zukünftigen Benutzer von additiven Fertigungssystemen in der richtigen Handhabung unterrichten. Viele Hochschulen entwickeln



bereits Programme zum Einsatz von 3D-Druck. Innerhalb dieser Programme werden neue Innovationen und ihre Anwendungen getestet – von 3D-gedruckten Nahrungsmitteln (an der Cornell University) bis hin zu gedruckten Kunststoffbooten (an der Universität von Washington). Die Beschaffung eines eigenen 3D-Druckers ist kostengünstig und einfach, wenn das Tool selbst das Tool produzieren kann: Ein einziger 3D-Drucker kann genutzt werden, um weitere 3D-Drucker zu erstellen, die dann den Studenten und Lehrern zu Lehrzwecken zur Verfügung gestellt werden können.

Um die nächste Generation von Wissenschaftlern und Ingenieuren zu fördern, stellt das von der DARPA gesponserte MENTOR-Programm 3D-Drucker in Industriequalität in ausgewählten High Schools in den USA zur Verfügung. Das Programm *SOLID Learning* wird in Grundschulen in den USA, Großbritannien, Australien und Südafrika gelehrt. Dieses Programm vermittelt den Lehrern Strategien, 3D-gedruckte Materialien und Tools in ihren vorhandenen Lehrplan einzubauen, um die Schüler besser unterrichten zu können.

Die Vorteile sind damit jedoch noch längst nicht ausgeschöpft. Lehrer haben häufig das Problem, dass sie nicht genug Lehrmaterial in einer Klasse bereitstellen können, insbesondere wenn die Klassengrößen zunehmen. Mithilfe eines 3D-Druckers könnten die Lehrer Laborausrüstung und Demoobjekte für die unterschiedlichsten Fächer konzipieren – von solarbetriebenen Wasser-Elektrolysesystemen bis hin zu 3D-gedruckten Modellen von Kunstwerken oder Fossilien. Neben Tiermodellen, für die kein einziges Tier getötet werden muss, und Repliken alter Kulturgegenstände können auch mathematische und luftfahrttechnische Entwürfe im Labor getestet werden, häufig mithilfe von Tools wie etwa einem Windkanal, die ebenfalls mit einem 3D-Drucker erstellt wurden. Eine der neueren Entwicklungen sind Formen von Tierfährten, die die Lehrer mit normalem Flüssigkunststoff und Silikonkomponenten füllen können, um Stempel zu erzeugen, wie in Abbildung 8.1 dargestellt.

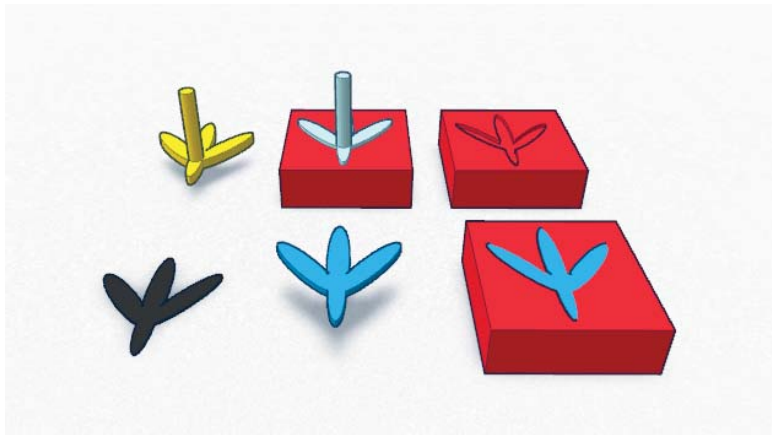


Abbildung 8.1: 3D-gedruckte Formen für Tierfährten. Hierfür wird zunächst der Fuß des Tiers eingesamnt und schließlich mit Tinte ein Fußabdruck erzeugt.

Anhand von RepRap-Druckern mit Schrittmotoren aus überflüssigen 2D-Druckern oder anderen grundlegenden Bauteilen aus lokalen Geschäften erhalten die Schüler ein Grundlagenwissen über mechanische und elektrische Steuerelemente, über Roboter-Feedbacksysteme, computergestützte Entwürfe und 3D-Modellierung. Sie erfahren mehr über die Eigenschaften verschiedener Materialien und die Vorteile der nachhaltigen Entwicklung.

### Die 3D-Druckoptionen erweitern

Von den ersten 3D-Objekten, die in einem Bad aus Flüssigpolymeren entstanden, bis hin zu den heute neuesten Zwei-Photonen-Lithographiesystemen hat sich der Detailgrad der gedruckten Produkte um das Hundertfache verbessert. Und selbst der Flüssigpolymer-Drucker wurde verbessert: Neue Innovationen, wie beispielsweise das Mikrogitter-Lithographiesystem, werden gerade von Forschern an den HRL Laboratories weiterentwickelt, um neue Möglichkeiten bei der Verwendung von Polymeren zu schaffen.

Wie wir in Kapitel 7 bereits besprochen haben, hat Objet den PolyJet entwickelt, weil das Patent für das grundlegende SLA-Verfahren noch geschützt war. Dieser Prozess wird sich fortsetzen. Andere Unternehmen werden neue Systeme auf den Markt bringen, die niedrigere Betriebskosten, eine höhere Geschwindigkeit, ein höheres Fertigungsvolumen und eine breitere Materialpalette unterstützen. Die Forscher entwickeln ständig neue Strategien, um Material schichtweise aufzutragen und ein virtuelles Modell in eine feste Form umzuwandeln. Selbst das grundlegende RepRap-System (Self-REplicating RAPid Prototyping) von Dr. Bowyer hat viele Iterationen durchlaufen, seit das ursprüngliche kartesische System eingeführt wurde, das die Motoren in X-, Y- und Z-Richtung bewegt hat. Heute reduzieren die Systeme von Delta und von Polar die allgemeine Komplexität (und die Kosten) von 3D-Druckern. Quentin Harley, ein Designer aus Südafrika, entwickelt derzeit seinen RepRap »Morgan« im Stil des Polar-Druckers (siehe Abbildung 8.2) und versucht dabei, die Kosten seiner Entwicklung auf weniger als 100 Dollar zu senken.



Abbildung 8.2: Der Niedrigpreis-RepRap Morgan  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von Quentin Harley)

Jeder neue Forscher und jeder neue Designer beschäftigt sich mit den grundlegenden Formen der 3D-Drucker und aktualisiert sie, und wenn erst die ursprünglichen Patente auslaufen, wird eine Flut an Erweiterungen entstehen. Bisher sind nur die vorläufigen Patente für die SLA- und FDM-Fertigung abgelaufen, aber 2014 werden die Patente für die grundlegenden Sintering-Systeme ablaufen. Wahrscheinlich wird es eine Fülle von neuen 3D-Druckern der Verbraucherklasse geben – und zahlreiche Forschungsarbeiten bereiten diese Phase vor. Eines der ersten Beispiele für den erwarteten Wettstreit um freiwerdende Patente ist die Klage von 3D Systems aufgrund der Veröffentlichung des SLA-Druckers Form 1 von FormLabs – mit einer Funktion, die vergleichbar ist mit der von einem abgeleiteten Patent abgedeckten Funktion, das sich immer noch im Eigentum von 3D Systems befindet. Eine Schwierigkeit für viele Innovatoren im Bereich des 3D-Drucks ist die kostspielige Patentrecherche, um kleine Erfinder davor zu schützen, ungewollt abgeleitete Patente zu duplizieren – was nicht nur für die gedruckten Objekte gilt, sondern auch für die Geräte, auf denen sie ausgedruckt werden.

### **3D-gedruckte Elektronik**

Von allen potenziellen Entwicklungen ist vor allem 3D-gedruckte Elektronik von besonderem Interesse, sowohl im gewerblichen als auch im privaten Bereich. Forscher an der Universität von Warwick haben einen leitenden, PCL-basierten Faden entwickelt, indem sie Ruß in geschmolzenen Kunststoff mischten, bevor er zum Faden extrudiert wurde. Das Ergebnis nennt sich *Carbomorph*. Carbomorph kann genutzt werden, um Schaltkreise direkt in Objekte zu drucken, sodass keine Drähte und Leiterbahnen mehr angebracht werden müssen, wie bei herkömmlich produzierten elektronischen Geräten. Die physischen Eigenschaften von Carbomorph gestatten außerdem, es in andere Objekte und in 3D-druckbare Materialien zu integrieren, sodass Sensoren direkt innerhalb des Objekts angelegt werden können. Diese Technologie wird unsere Reparaturverfahren nachhaltig verändern – so wie aus einem Stück bestehende Motherboards im Computer die Desktop-PCs revolutioniert haben. Man tauscht das ganze Teil aus, wenn es kaputt geht. Der Schutz, der durch die Integration der Elektronik direkt in eine Komponente entsteht, sollte jedoch dafür sorgen, dass sie länger haltbar ist als ihr auf Kabelverbindungen basierender Vorgänger.

### **Funktionale Designs schaffen**

Disney erforscht gerade Möglichkeiten, Elektronik in 3D-gedruckte Objekte zu integrieren, um die nächste Spielzeuggeneration zu schaffen, wie beispielsweise die in Abbildung 8.3 gezeigten Schachfiguren, die eine aktuelle oder von einem Computergegner geplante Brettposition anzeigen.

Die heutigen 3D-gedruckten Elektronikgeräte enthalten bisher nur Lichtleitungen für Displays und Leiterbahnen, aber die Forschung erkundet bereits komplexere Herstellungstechniken, mit denen bald schon ganze Geräte mit Elektronik aus einer Designdatei gedruckt und sofort benutzt werden können. Stellen Sie sich beispielsweise 3D-gedruckte Batterien oder Fotovoltaikfelder vor, die Strom für 3D-gedruckte Schaltkreise und Displays bereitstellen, gesteuert über 3D-gedruckte Sensoren – alles innerhalb eines einzigen Objekts. Heutige

Arbeitsmodelle, die direkt aus den 3D-Druckern kommen, entwickeln sich schnell über die Möglichkeiten der ursprünglichen nicht funktionalen Prototypen hinaus, für die die additive Fertigung ursprünglich vorgesehen war.



Abbildung 8.3: Ein Beispiel für die integrierte Elektronik in interaktiven Schachfiguren von Disney  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von Karl Willis/Disney)

## Drohnen, Roboter und militärische Anwendungen

Die US-Armee arbeitet gerade an der Entwicklung von 3D-Druckern, mit denen Drohnen und Roboter erstellt werden können, wobei nicht nur die baulichen Komponenten und die Steuerelektronik ausgedruckt werden, sondern auch die Mikrobatterien und die Steuerungsschnittstellen. Auf diese Weise wird man in Zukunft eine Fertigungsanlage irgendwo in einem Frontgebiet absetzen können und sie viele Drohnen, unbemannte U-Boote oder terrestrische Roboter herstellen lassen können, um Daten in feindlichen Umgebungen zu sammeln, ohne dass Kampfflugzeuge einer Gefahr ausgesetzt werden.

Wenn diese Möglichkeit auf die Herstellung von Explosionsstoffen ausgedehnt wird, könnte dieselbe Fertigungsanlage ein ganzes Heer an Kampfmaschinen ausspucken, die einen Krieg fernbedient führen könnten – oder völlig unabhängig –, angeleitet von einer asynchronen Programmierung vor dem Einsatz, ohne die eigenen Streitkräfte einem Risiko auszusetzen. Angesichts der weit fortgeschrittenen Experimente mit künstlicher Intelligenz warnen einige Forscher schon davor, dass eine *Skynet*-ähnliche Bedrohung wie aus den *Terminator*-Filmen entstehen könnte, wenn man nicht sorgfältige Kontrollen einführt, um die Übernahme der Kontrollsysteme durch feindliche Hacker zu verhindern.

Die direkte Produktion funktionaler Geräte wird bereits anhand des experimentellen Raumflugzeug-Prototyps LOHAN (Low Orbit Helium Assisted Navigator) für große Höhen an der Universität Southampton erforscht. Eines der Vorgängerprojekte war das 3D-gedruckte *Sulsa* (Southampton University Laser-Sintered Aircraft), das erste vollständig per 3D-Druck erstellte Flugzeug in voller Größe. Auch Airbus und andere Fluggesellschaften beschäftigen

sich mit dem Potenzial der Direktproduktion ganzer Flugzeuge unter Verwendung eines sehr großen 3D-Druckers, um die Möglichkeit zu erhalten, das Gewicht der Fluggeräte zu minimieren und weniger Aluminium zu benötigen, während die strukturelle Stärke beibehalten wird und weniger Montagearbeiten nach der Fertigung erforderlich sind.

## **Von-Neumann-Maschinen**

Selbst-replizierende nichtorganische Lebensformen wurden ursprünglich in den 40-er Jahren vom Mathematiker John von Neumann beschrieben. Die erste Erwähnung des Konzepts von Maschinen, die selbst Maschinen bauen, reicht in der Literatur jedoch in die Anfänge des 19. Jahrhunderts zurück. Die Ideen von Neumann wurden in vielen künstlerischen Kreationen aufgegriffen – unter anderem auch in der berühmten Fernsehserie *Stargate*, wo die bedrohlichen Replikatoren aus grundlegenden Bausteinen hergestellt wurden (Abbildung 8.4 zeigt eine Kopie des Requisites), die dann selbst wiederum lokale Ressourcen ernteten, um weitere Kopien von sich selbst anzufertigen.



*Abbildung 8.4: Eine 3D-gedruckte Kopie des Replikator-Blocks*

Obwohl es sich dabei nur um fiktive Kreationen handelt und es bisher keine selbstreplizierenden Roboter gibt, kann das RepRap-3D-Drucker-Design viele Materialien drucken, die für die Herstellung eines weiteren 3D-Druckers benötigt werden. Diese Fähigkeit ist ein erster Schritt hin zur Selbstreplikation. Einige Forscher äußerten bereits die Sorge, dass irgendwann einmal selbstreplizierende Roboter ihre eigenen Materialien aus der Umgebung abgreifen könnten, und eine nanotechnologische Waffe versehentlich das gesamte Material in eine »graue Schmiere« (das sogenannte »Gray-Goo-Szenario«) umwandeln könnte, um Nanofabriken zu bauen, die wiederum selbst versuchen, weitere Nanofabriken herzustellen. Derzeit versuchen Forscher, automatisierte Herstellungsfabriken zu schaffen, um Rohmaterialien aus dem Meerwasser oder aus Mondgestein zu gewinnen, während sie gleichzeitig verhindern wollen, dass die Expansion außer Kontrolle gerät und die Welt in einem riesigen »Gray Goo« untergeht. Potenzielle Nutzungszwecke für Nanofertigungen und Nanotechnologie sind in *Nanotechnologie für Dummies* von Earl Boysen, Nancy C. Muir und Desiree Dudley genauer beschrieben.

## Erweiterte Materialauswahl

In Kapitel 4 haben wir zahlreiche der derzeit verfügbaren Materialien beschrieben, aber es werden ständig neue entwickelt. Unentwegt denken sich die Forscher neue oder hybride Materialien aus, um weitere Möglichkeiten für den 3D-Druck zu schaffen. Das leitende Material »Carbomorph« ist ein Beispiel für ein hybrides Verbundmaterial, das aus geschmolzenem Thermoplast und Ruß besteht, und das unter Verwendung standardmäßiger ABS-Vorrichtungen auf einem standardmäßigen 3D-Drucker ausgedruckt werden kann, das aber gleichzeitig elektrisch leitfähig ist.

Andere Optionen sind unterschiedliche Farben für die Fäden oder Fäden mit Metallic-Effekt, mit einem von der Temperatur abhängigen Farbwechsel oder mit Pigmenten und Farbstoffen, die im Dunkeln leuchten. Andere Forscher, wie beispielsweise der Deutsche Kai Parthy, entwickeln weitere Materialien für Drucker, die privat genutzt werden. Ein Beispiel für die Verwendung von Verbundmaterial ist LayWoo-d3, ein Material, das wie Holz aussieht, und das wie Holz bearbeitet werden kann. Weitere Beispiele aus dem Verbraucherbereich sind LayBrick, ein Material, das an Sandstein erinnert und für Architekturmodelle verwendet wird, oder BendLay, ein durchsichtiger und flexibler Faden für Lichtröhren.

Eine neuere Entwicklung bei den Materialien für 3D-Drucker ist der sogenannte »4D-Druck«. Nein, dabei werden nicht wirklich theoretische mehrdimensionale Objekte wie der Tesseract hergestellt (in den drei Standarddimensionen in Abbildung 8.5 gezeigt). Beim 4D-Druck werden – laut Entwickler am MIT – Materialien während der Herstellung so angeordnet, dass ein reaktives Material entlang eines flexiblen Materials angebracht wird, um ein verbundenes »Sandwich« aus beidem zu bilden. Nachdem die Herstellung abgeschlossen ist, bewirkt eine Erwärmung des reaktiven Materials, dass sich das gedruckte Objekt verformt oder

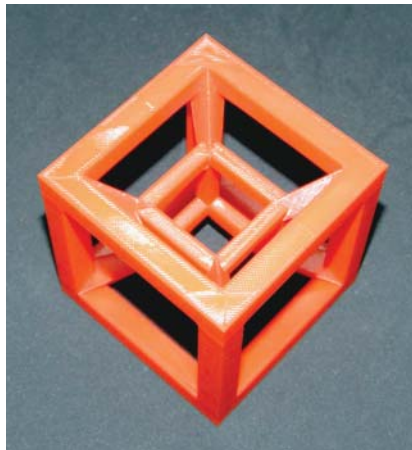


Abbildung 8.5: Ein 3D-Modell eines theoretischen 4D-Würfels, des sogenannten Tesserakts



seinen Umriss ändert. Mit anderen Worten, das Objekt wird in drei physischen Dimensionen gedruckt, aber es entwickelt sich erst im Laufe der Zeit vollständig (und Zeit ist laut Einstein die vierte Dimension).

### Ausstattung langer Weltraummissionen

Die amerikanische NASA (National Aeronautics and Space Administration) erforscht Technologien, die die bemannte Raumfahrt über die Erdatmosphäre hinaus gestatten – unter anderem einen speziellen FDM 3D-Drucker, der zur ISS (International Space Station) gesendet wird. Weitere Anwendungen für das Weltall sind unter anderem:

- ✓ Drucker, die mithilfe von Elektronenstrahlen Draht statt eingblasenen Metallgranulats schmelzen, und die in Umgebungen eingesetzt werden können, wo annähernd Vakuum herrscht
- ✓ 3D-gedruckte Düsen und andere Komponenten eines Raumschiffs
- ✓ 3D-Drucker, die in der Lage sind, Lebensräume für Forscher aus vor Ort vorhandenem Material und Sonnenenergie zu erschaffen (siehe Abbildung 8.6)

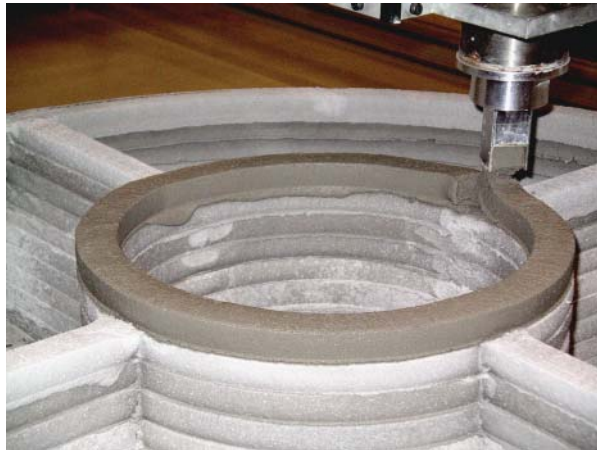


Abbildung 8.6: Ein Prototyp für ein Gebäudemodul auf dem Mond mit mehreren Abschnitten  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von Contour Crafting)

- ✓ Lange haltbare Lebensmittel, die aus Pulver und Wasser zu fester Form gedruckt werden können
- ✓ Biodrucker, die alles herstellen können, von verzehrbarem Fleisch für den Proteinbedarf der Astronauten bis hin zu Körpergewebe und Organen für medizinische Eingriffe, die erforderlich sind, wenn sich die Raumschiffe in unerreichbarer Entfernung zur Erde befinden.



Egal, ob es bei den Reparaturen um das Raumschiff oder um seine Besatzung geht, oder um ihre Unterkunft in unendlicher Entfernung von zuhause, die NASA investiert in Forschungsarbeiten, die die Astronauten mit allem ausstatten, was sie während ihrer Reise benötigen könnten – selbst wenn zu dem Zeitpunkt, da sie die Erde verlassen, dieses bestimmte Werkzeug noch gar nicht erfunden ist. Auf diese Weise müssen sie nicht von jedem Werkzeug zwei Stück mitnehmen, um ein Ersatzteil zu haben (außer vielleicht Ersatzteile für den 3D-Drucker, von denen viele über einen weiteren 3D-Drucker ausgedruckt werden können). Damit wird eine internationale Mission sehr viel einfacher, weil man sich keine Gedanken mehr darüber machen muss, dass man vielleicht einen Schraubenschlüssel für ein englisches Maß benötigt, aber nur metrische Werkzeuge zur Verfügung stehen (oder umgekehrt), um Komponenten zu reparieren, die in unterschiedlichen Ländern gebaut wurden.

Tatsächlich hofft die Forschung der NASA in diesem Bereich, dass irgendwann auf Asteroiden und anderen Gesteinsbrocken Material für die ausschließlich im Weltall stattfindende Herstellung von Raumschiffen, Raumstationen und Solarkraftwerken abgebaut werden kann. Wenn diese ausreichend groß gebaut werden, könnten sie Strom aus dem Weltall zur Erde übertragen und vielleicht sogar Schatten spenden, um die Erdaufwärmung zu reduzieren. Die additive Fertigung bietet also das Potenzial, unsere Welt so zu verändern, wie wir es uns niemals hätten vorstellen können, als wir zum ersten Mal eine per Laserstrahl geschmolzene Flüssigkeit in Hartplastik umgewandelt haben.

Viele dieser Experimente beschreiben Situationen, von denen wir noch Jahrzehnte entfernt sind. Die heutigen Forscher verwenden die additive Fertigung jedoch bereits, um Strategien für die Erneuerung der Erdressourcen zu testen. Dazu verwenden sie Designs wie beispielsweise das in Abbildung 8.7 gezeigte künstliche Riff. Das Riff soll aus synthetischem Gestein oder Beton hergestellt werden. Damit soll getestet werden, ob sich Korallen und andere Meereslebewesen darin ansiedeln. Diese Bestrebungen können dabei helfen, die von der Menschheit zerstörten natürlichen Riffs zu reparieren.

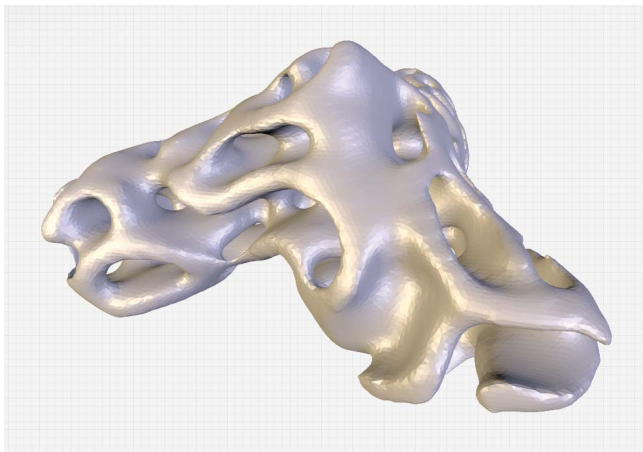


Abbildung 8.7: Eine 3D-Darstellung eines Riffs

## *Möglichkeiten in der Medizin*

Neben den 3D-gedruckten Habitaten für lebende Organismen, wie beispielsweise spezielle Behausungen für Einsiedlerkrebse oder neue Unterwasserparks, in denen Fische schwimmen und sich verlustieren können, werden mit dem 3D-Druck auch immer mehr neue Entwicklungen in der Medizin möglich.

Die ersten medizinischen Anwendungen des 3D-Drucks in der Medizin waren externe Geräte und Prothesen, die ihren Trägern das Leben leichter machen sollten. Neuere Implantate wie beispielsweise Kieferknochen oder Schädelplatten werden heute schon von Ärzten genutzt, um ihre Patienten zu versorgen. In Kürze werden 3D-Drucker Patienten ihre ganz individuelle Medizin drucken, wobei die tägliche Dosis verschiedener Medikamente genauso gemischt wird, wie es für die Behandlung des jeweiligen Patienten erforderlich ist.

Der vielleicht erstaunlichste Forschungsbereich in der additiven Fertigung ist das Bioprinting, wobei lebende Gewebe und Organe aus sorgfältig geschichteten Zellen erstellt werden, die dann in der gewünschten Form wachsen. Heute sterben viele Patienten, die auf eine Organspende angewiesen sind, weil kein passender Spender gefunden wird. Andere müssen ihr Leben lang Medikamente gegen eine Abstoßung gespendeter Organe einnehmen, weil keine vollständige Übereinstimmung gefunden werden konnte. Über das Bioprinting könnten Strukturen aus den eigenen Zellen eines Menschen genutzt werden, sodass keine Probleme mehr im Hinblick auf Verfügbarkeit und Abstoßung entstehen, und auch keine ethischen und religiösen Bedenken mehr gegenüber Transplantationen von Körperteilen von in der Regel verstorbenen Spendern notwendig sind.

Derzeit entwickeln Forscher Techniken für Ersatzorgane, die mit 3D-Druck erzeugt werden. Über kleine orthoskopische Öffnungen soll das ausgefallene Organ entfernt und das neue Organ innerhalb des Körpers des Patienten produziert werden. Damit wird eine sekundäre Verletzung durch die eigentliche Operation vermieden, das Risiko von Operationen wird gesenkt und die Patienten erholen sich nach einem Eingriff sehr viel schneller wieder. Es wurden bereits erste einfache Gewebe ohne Struktur erzeugt, und mittlerweile wurden auch winzige Blutgefäße erfolgreich 3D-gedruckt, indem Zuckergerüste eingesetzt wurden, um die herum sich die Zellen verbinden konnten. Und vor Kurzem wurden auch komplexere Organe getestet, wie beispielsweise eine Leber, die aus Spenderzellen in geschichteten Konfigurationen hergestellt wurde, und die die für das Überleben erforderliche Filterfunktion bereitstellen konnte. Der wirkliche Durchbruch dieser Technologien ist noch nicht geschafft, aber 3D-gedruckte Stents (Erweiterungsröhren, die verstopfte Blutgefäße offen halten) und einfache künstliche Strukturen zur Behandlung von Luftröhren- und Nierenkrankheiten wurden bereits an Patienten erprobt.

Der Bereich des Bioprintings wird fast täglich maßgeblich erweitert. Die Forscher streben nach wichtigen Patenten, die die Entwicklung von chirurgischen Produkten für Jahrzehnte sichern werden. Der Wettbewerb ist bereits heute schwer umkämpft: Mehrere Labors, die ursprünglich Interesse gehabt hatten, ihre Technologien in diesem Buch vorzustellen, zogen ihre Beiträge zurück und forderten, Details und Fotos aus dem Manuskript zu entfernen, um ihr geistiges Eigentum nicht zu gefährden. Forscher in den USA, in der EU, in Japan und China sowie in vielen anderen Gebieten wollen die ersten sein, die ein Patent für ein 3D-gedrucktes Herz und vergleichbare Errungenschaften erhalten. In diesem Bereich wird es lange Zeit keine Open Source-Designs geben.

## Teil IV

# Private 3D-Drucker verwenden



## ***In diesem Teil ...***

- ✓ Lernen Sie Beispiele für Kunstwerke kennen, die mit 3D-Druckern möglich sind.
- ✓ Erfahren Sie, wie diese interessante Technologie zuhause und in kleinen Unternehmen genutzt werden kann.
- ✓ Lernen Sie mehr darüber, was Sie bedenken sollten, bevor Sie sich für einen 3D-Drucker entscheiden, unabhängig davon, ob Sie einen solchen kaufen oder sich selbst einen bauen.
- ✓ Lernen Sie die verschiedenen Koordinatensysteme für 3D-Drucker kennen.

# 3D-gedruckte Kunst



## *In diesem Kapitel*

- ▶ Ziergegenstände für den Körper entwerfen
- ▶ Unsere Umgebung personalisieren
- ▶ Zur eigenen Kreativität zurückfinden
- ▶ Abstraktes visualisieren

---

**D**ie additive Fertigung bietet zahlreiche neue Techniken für die Erschaffung von ineinandergreifenden Komponenten oder Objekten mit komplexen Innenstrukturen. Deshalb ist es auch kaum überraschend, dass kreative Menschen sie höchst attraktiv finden. Mit dieser Technologie können Künstler Designs oder Strukturen erschaffen, die mit herkömmlichen Mitteln nicht zu realisieren sind. Dieses Kapitel zeigt einige der vielen verschiedenen künstlerischen Ausdrucksmöglichkeiten, die mit dem 3D-Druck umgesetzt werden können – von eher kleinen persönlichen Entwürfen bis hin zu mehrstöckigen Skulpturen für den Außenbereich. Die hier vorgestellten Künstler haben uns freundlicherweise gestattet, Bilder ihrer Kreationen zu zeigen. Viele stellen sie auch zum Download für andere bereit. Wo immer es möglich ist, geben wir die entsprechenden Quellen an, damit Sie ein paar dieser Arbeiten ausprobieren können, sobald Sie in Teil V Ihren eigenen 3D-Drucker gebaut haben.

## *Ziergegenstände für den Körper*

Zu den ersten Anwendungen für die Verschönerungen unseres Körpers aus dem 3D-Drucker gehören personalisierter Schmuck und auf Kunststoff basierende Kleidungsstücke – deren Design und Aussehen zu dem individuellen Geschmack und den Vorlieben des Trägers passt. Der Kunde wählt das virtuelle Modell für die Herstellung aus, das dann in genau seiner Größe hergestellt wird. In Kapitel 6 hatte ich bereits den Onlineshop des Künstlers Asher Nemias (Dizingof) vorgestellt, in dem er seine von der Mathematik inspirierten Designs anbietet, die über Ponoko in Gold, Silber und anderen Materialien verkauft werden.

Abbildung 9.1 zeigt einen weiteren Onlineshop, der von mehreren Designern auf Cubify betrieben wird, wo sowohl reale Objekte als auch einige virtuelle 3D-Modelle für den Download und die Eigenanfertigung angeboten werden. Hier können verschiedenste Modeartikel – von Schuhen bis hin zur 3D-gedruckten Kleidung – gekauft und angepasst werden. Gewerbliche Anbieter verwenden dieselben Technologien, um individuell angefertigte Sportkleidung für den Wettkampf anzufertigen, wobei das Gewicht der Artikel möglichst weit reduziert wird oder Funktionen angeboten werden, die es bei vergleichbaren Artikeln aus dem Regal, die auf herkömmliche Weise angefertigt wurden, einfach nicht gibt. Beispielsweise können

heute Laufschuhe ganz nach der individuellen Bewegungsform des Läufers mit Stützen und strukturellen Elementen 3D-gedruckt werden, und das Ganze mit minimalem Gewicht und perfekt an die Körpermaße des Sportlers angepasst, um die Leistung im Wettkampf noch weiter zu verbessern.

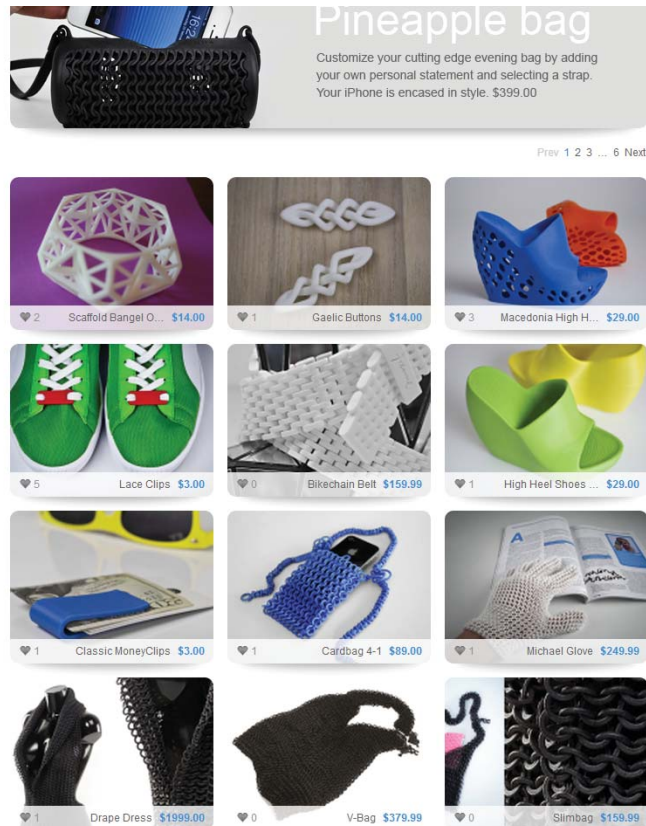


Abbildung 9.1: Der Onlineshop für 3D-Druck-Mode mit Armbändern, Haarklammern, Schuhen und sogar 3D-gedruckter Kleidung und Handtaschen

## Individualisierung der Umgebung

Einst haben geübte Handwerker Dinge in ihrer Schmiede oder in der Schreinerei unter höchstem Aufwand speziell angefertigt. Heute können Handwerker und Künstler die additive Fertigung nutzen, um ihre Werke problemlos ganz individuell an unterschiedliche Größen und persönliche Vorlieben anzupassen.

Abbildung 9.2 zeigt mehrere 3D-gedruckte Gitarrenkörper von Olaf Diegel, der einen voll funktionsfähigen E-Gitarrenkörper genauso anpassen kann, dass er zu der Arm- und Fingerlänge des Künstlers passt, ebenso wie zu dessen ganz persönlichen ästhetischen Wunschvorstellungen.



Diese Artikel können so angefertigt werden, dass sie zum Stil einer Band passen – oder zu den Marketingstrategien für die Musik der Band.



Abbildung 9.2: Beispiele für die individuellen 3D-gedruckten Gitarrenkörper von Olaf Diegel  
– alles voll funktionsfähige Instrumente

Darüber hinaus kann abstrakte Information in einen Festkörper umgewandelt werden, um unsere Umwelt uns anzupassen. Mithilfe von 3D-Drucksystemen können wir speziell geformte, von der Biologie inspirierte Formen für Häuser und Statuen schaffen, wie beispielsweise die baumähnliche Struktur von den Francis Bitoni Studios (siehe Abbildung 9.3).

Heute können wir den 3D-Druck nutzen, um Spielzeug, Werkzeuge und sogar unsere Umgebung speziell anzupassen. Und die Zukunft dieser erstaunlichen Technologie bietet gar das Potenzial, auch unsere Körper anzupassen. Nachdem der Bereich des Bioprintings weiter ausgereift sein wird, werden Ersatzteile für unseren Körper völlig neue Märkte eröffnen. Eines Tages können wir einen Ersatz für ausgefallene Organe oder sogar Verbesserungen unserer Muskeln und Gliedmaßen ausdrucken. Wenn Schauspieler ihr Erscheinungsbild ändern können, um in eine ganz bestimmte Rolle zu schlüpfen, oder Sportler so einfach neue Muskeln und Bindegewebe hinzufügen können, wie sie heute ihre Laufschuhe anpassen, braucht unser Rechtssystem neue Methoden, um diese neuen Möglichkeiten zu reglementieren.

## Die eigene Kreativität wiederentdecken

In der Vergangenheit haben Handwerker Stein gemeißelt und Holz geschnitzt, um in Form und Funktion individuelle Kreationen zu schaffen. Die Massenfertigung hat diesen zeitaufwändigen



Prozess ersetzt, indem große Mengen an Waren hergestellt werden, schnell genug, um die rapide wachsende Bevölkerung zu versorgen – aber auf Kosten der kleinen individuellen Merkmale, wie sie bei früheren Designs üblich waren. Viele ältere Gebäude verdeutlichen dies: Ihre Wände sind mit Wasserspeiern und anderen Dekoelementen geschmückt, und dies selbst an Orten, wo es für die Passanten nicht offensichtlich war. Die heutigen Konstruktionen aus Betonfertigteilen sind zweifellos schneller, aber man verzichtet auf diese kleinen Details, weil dies unnötiges Beiwerk ist. Mit der Entwicklung der 3D-Drucker können wir wieder zu einer weniger »vorgefertigten« Welt zurückkehren und unseren Gestaltungsideen wieder einen künstlerischen Ausdruck mitgeben. Wir könnten mit den 3D-Druckern sogar wieder Wasserspeier herstellen, die an den Dachrinnen unserer Häuser befestigt sind, und auf diese Art und Weise diese einzigartigen Kunstwerke restaurieren und bewahren.



*Abbildung 9.3: 3D-gedruckte Statue für den Außenbereich von Francis Bitoni Studio  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von Francis Bitoni Studios)*

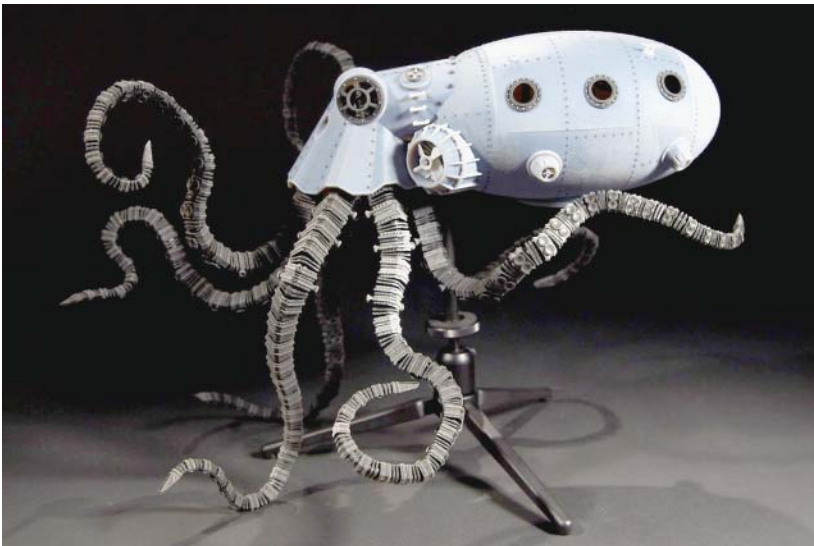
Abbildung 9.4 zeigt Vasen aus gefärbten Nylonfäden. Sie basieren auf einem Design von Richard sowie auf in Thingiverse veröffentlichten Designs, aber die Einstellungen des lokalen Herstellers machen sie einzigartig in Form und Farbe. Wir können immer mehr unserer persönlichen Vorstellungen und Vorlieben in neue Kreationen einbringen und damit eine sehr viel individuellere Umgebung für uns schaffen und damit der von der Massenfertigung geprägten Standardwelt entfliehen.

Und wir können auch unseren Maschinen ein sehr viel individuelleres Erscheinungsbild geben, wie das prächtige experimentelle Design für ein Forschungs-U-Boot in Abbildung 9.5 zeigt. Der Octopod, das kreative Design von Sean Charlesworth, ist ein biomimetisches Konzept für ein Unterwasserfahrzeug, das für Wiederherstellungsarbeiten und Abfallverwertung eingesetzt werden soll, inspiriert von dem Tier, das sich in der Natur ganz ähnlich verhält. Die Anlehnung

an die Natur ermöglicht neue Designs, die von der Spezialisierung ganzer Generationen profitieren. Es werden dadurch neue Qualitäten möglich, die es in den herkömmlichen Varianten nicht gibt.



*Abbildung 9.4: Vasen von Richard aus gefärbtem Nylonfaden, gedruckt mit einem RepRap-Drucker, wie wir ihn in Kapitel 11 genauer vorstellen*



*Abbildung 9.5: Der Octopod, ein Konzept für ein Unterwasserfahrzeug für die Wiederherstellung und Abfallverwertung von Sean Charlesworth  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von Sean Charlesworth/Charlesworth Dynamics)*



*Abbildung 9.6: Die Iris-Box für die Tochter von Kirk, entworfen von Sean Charlesworth (Count-Spatula) und geteilt auf Thingiverse*

Sean hat eine einzigartige Iris-Tür geschaffen, die dem Taucher den Ausstieg aus dem Octopod ermöglicht, und die er dann in Form einer 3D-druckbaren Geschenkschachtel als Thing #31855 auf Thingiverse geteilt hat. Kirk hat die in Abbildung 9.6 gezeigte Kopie für seine Tochter ausgedruckt, in der sie Ohrringe und andere kleine Dinge aufbewahren kann, in einer Farbe, die genau zu ihrem Zimmer passt.

## **Abstraktes visualisieren**

Einer der attraktivsten Aspekte des 3D-Drucks als Medium für den künstlerischen Ausdruck ist, dass damit sehr abstrakte Ideen in Festform ausgedrückt werden können. Häufig werden schwierige Konzepte damit verständlicher erklärt, als durch eine reine Beschreibung oder 2D-Fotos.

Mathematische Modelle sind atemberaubend detailliert und flüssig in ihrer Darstellung. Designs wie die von Asher Namias und Stijn van der Linden (siehe Abbildung 9.7) können einfache Gleichungen in elegante Kunstwerke umwandeln.



Abbildung 9.7: Von der Mathematik inspirierte 3D-gedruckte Objekte von den Designern Stijn van der Linden (Virtox) und Asher Namias (Dizingof), heruntergeladen von Thingiverse

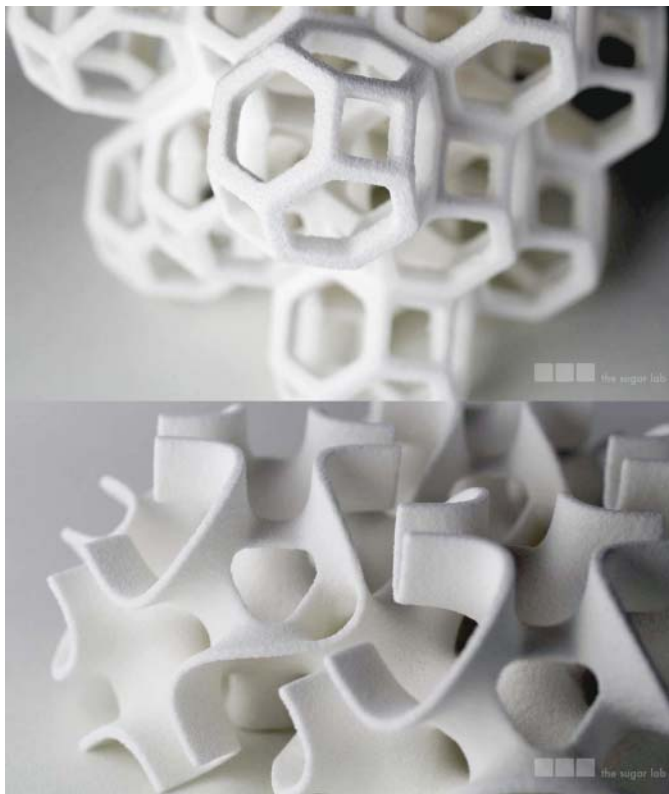
### Wenn das Teilen zu weit geht

Abbildung 9.7 verdeutlicht ein aktuelles Problem bei Open Source-Designs, die für die Herstellung durch andere geteilt werden. Die Vase Julia oben links bleibt als Thing #126567 unter der Creative Commons-Lizenz verfügbar, mit der Forderung, dass die Abbildung dem Künstler zuzuordnen ist. (Stijn van der Linden ist auf der Plattform auch als Virtox bekannt.) Die anderen Designs der Gyroid-Vase, der Lava-Vase und der Klein-Flaschen werden von ihrem Designer nicht mehr geteilt (Asher Namias, auch bekannt als Dizingof). Er verwendete ähnliche CC-Lizenzen mit der Forderung, dass man die Designs ihm zuordnen kann, als er seine bemerkenswerten Designs zum Download zur Verfügung stellte – damals konnte ich sie auch für meine Kurse ausdrucken.



Irgendwann stellte Asher fest, dass seine Arbeiten häufig genutzt wurden, um die Fähigkeiten kommerziell erhältlicher 3D-Drucker zu demonstrieren, die filigranen und fließenden Formen dieser von der Mathematik inspirierten Modelle zu reproduzieren. Dabei ignorierten die Anbieter aber die Bedingung für die Lizenzerteilung, eine sichtbare Zuordnung anzubringen, anhand derer der Designer des Objekts erkennbar gewesen wäre. Aus diesem Grund können die Designs zwar noch über die Onlineshops von Asher Namias gekauft werden, aber sie stehen nicht mehr zum Download oder für die lokale Fertigung zur Verfügung. Mit der weiteren Verbreitung der 3D-Drucker werden solche Probleme häufig auftreten, weil unsere Gesetze nicht auf Konzepte ausgelegt sind, die nur als elektronische Daten dargestellt werden.

Mathematische Modelle werden auch von Sugar Lab verwendet, um erstaunliche essbare Kreationen aus Granulatzucker zu formen (siehe Abbildung 9.8). Dabei handelt es sich um wunderbare Beispiele für neue Möglichkeiten der Personalisierung, die durch die additive Fertigung in ganz neuen Bereichen möglich sind. Und nicht nur erfolgreiche 3D-Drucks, sondern selbst Ausschuss aus fehlgeschlagenen Druckvorgängen und die entsorgten Trägermaterialien können zu wahren Kunstwerken werden.



*Abbildung 9.8: Essbare mathematische Kunst  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von Sugar Lab)*

3D-druckbare Objekte können ganz einfach geteilt werden und bieten neue Möglichkeiten für Künstler, die Öffentlichkeit in »crowdsourced« Kunst einzubinden, wie beispielsweise in dem PrintToPeer-Projekt des Künstlers Jeff de Boer. Dieser kanadische Künstler ist bekannt für seine 3D-gedruckten Designs, inspiriert von Rüstungen, wie etwa Kettenhemden, Schildern und Panzern. Er hat eine Site geschaffen, auf der seine Kunst bereitgestellt wird, und wo jedermann seine eigenen, persönlichen Kettenglieder herstellen und dann Kopien ausdrucken kann, die er dann an den Künstler schickt.

Abbildung 9.9 zeigt das Design, das Kirk unter Verwendung des Logos für dieses Buchs erstellt hat, und das er dann heruntergeladen und in verschiedenen Farben und Farbkombinationen mit Kunststofffaden ausgedruckt hat. Auch sie werden in das riesige Kunstwerk aufgenommen, das Jeff de Boer aus den Einsendungen aller Mitwirkenden herstellen wird. Ein paar davon stammen auch von den Kindern und von den Studenten von Kirk, die sie für sich selbst gedruckt haben. Das Design steht ebenfalls über Shapeways zur Verfügung.



Abbildung 9.9: PrintToPeer-Kettenglieder mit dem »Für Dummies«-Design

Nachdem die ursprünglichen Patente für das selektive Laser-Sintering 2014 ablaufen werden, wird die Herstellung Hunderter dieser Kettenglieder nicht mehr Wochen dauern, indem jeweils sechs davon auf einer flachen Aufbauplatte ausgedruckt werden, sondern das Ganze kann innerhalb von wenigen Stunden passieren, indem sie stapelweise im dreidimensionalen Fertigungsraum ausgedruckt werden. Die Individualisierung von 3D-gedruckten Kunstwerken

und sogar von Visitenkarten wird in den nächsten Jahren noch deutlich zunehmen, weil sie eine Möglichkeit darstellt, sich von der Masse abzuheben.

Kirk gibt so oft es geht Beispiele für 3D-gedruckte Materialien weiter. Er wurde schon häufig angesprochen, um mehr über die additive Fertigung und sein Lernprogramm SOLID Learning zu erzählen. Das Ganze hat sich bereits herumgesprochen. Vor Kurzem hat ihn der Dekan einer Universität zu sich gebeten, um ihm ein bemerkenswertes Filmrequisit aus *Jäger des verlorenen Schatzes* zu zeigen (siehe Abbildung 9.10), das Kirk irgendwann als Beispiel für einen Workshop ausgedruckt hatte, und wofür er das Design eines Fans benutzt hatte, der es als Thing #118125 auf Thingiverse geteilt hatte.



Kunst kann auch einem Zweck dienen, ohne ihren künstlerischen Wert zu verlieren. Wir möchten Sie deshalb ermutigen, Ihre Ideen in Designs festzuhalten und die 3D-Modelle zu sammeln, die Ihnen gefallen. Drucken Sie Kopien davon aus und geben Sie sie weiter, um die Änderungen bekannt zu machen, die mit der Weiterentwicklung der additiven Fertigung in ihren verschiedenen Formen bevorstehen. Wenn Sie möchten, dass Sie jemand anruft, damit Sie ihm weitere Informationen bereitstellen können, nehmen Sie einfach Ihren Namen und Ihre Kontaktinformationen in das von Ihnen gedruckte Objekt auf. Es kostet Sie nichts mehr, ein Objekt mit »eingraviert« Botschaft herzustellen.



Abbildung 9.10: Eine Kopie einer Filmrequisite aus *»Jäger des verlorenen Schatzes«*, gedruckt nach einer von seinem Designer (MacGyver) auf Thingiverse geteilten Vorlage



# 3D-Drucker für den Verbraucher

# 10

## In diesem Kapitel

- ▶ 3D-Drucker mit kartesischem System genauer betrachten
- ▶ Delta-Optionen kennenlernen
- ▶ Die Fertigung unter Verwendung von Polarkoordinaten verstehen
- ▶ Die in Entwicklung befindlichen Alternativen erwarten

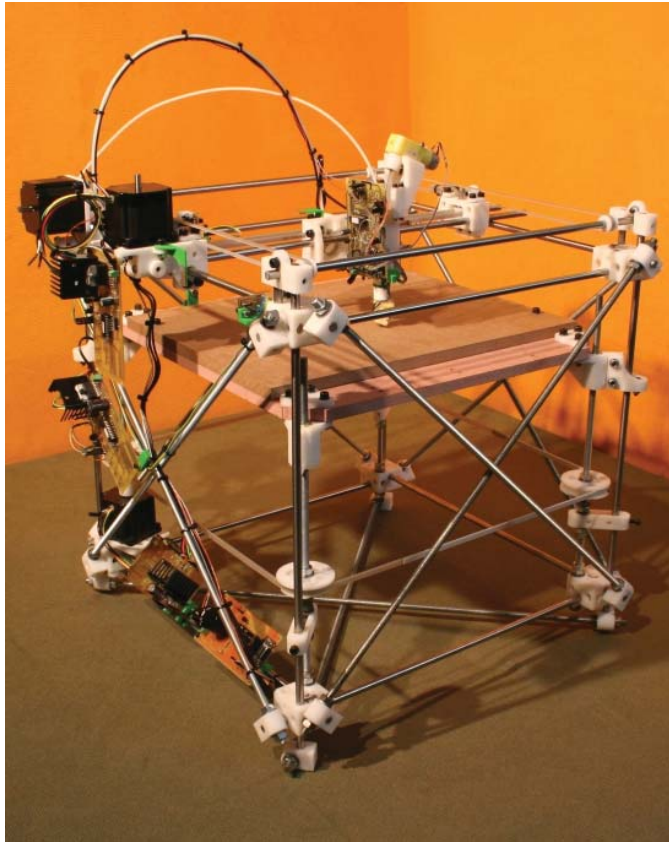
**B**isher ging es in diesem Buch um die vielen verschiedenen Arten der additiven Fertigung. Dabei wurden die verschiedensten Anwendungen dieser Technologie heute und eine Vorschau auf die nahe Zukunft gezeigt. Dieses Kapitel betrachtet die verschiedenen 3D-Drucker, die Sie kaufen oder selber bauen können – zum Preis eines Heimgeräts.

Gewerbliche Systeme verwenden viele Materialien und Herstellungstechniken, die immer noch unter dem Schutz der Rechte auf geistiges Eigentum stehen. Aber die neuesten Typen der additiven Fertigung, wie beispielsweise Stereolithografie (SLA), Fused Freeform Fabrication (FFF) und Fused Deposition Modeling (FDM) sind in den Public Domain-Bereich übergegangen. Heute gibt es immer mehr FFF/FDM-3D-Drucker. Anbieter wie beispielsweise Microsoft führen den beliebten MakerBot Replicator 2 in ihren Shops, und der Bürausstatter Staples bietet sowohl den Cube-Drucker als auch die Kartuschen mit den proprietären Kunststofffäden für seinen Betrieb an.

In den folgenden Kapiteln wird es um den Bau von RepRap-3D-Druckern (Self-REplicating RAPid Prototyping) gehen, die Sie komplett montiert oder als Bausatz kaufen oder auch unter vollem Körpereinsatz und mit handwerklichem Geschick aus handelsüblichen Teilen ganz alleine bauen können. Die RepRap-Plattform wurde überarbeitet und unterstützt jetzt viele verschiedene Konfigurationen. Sie kann sowohl für die Extrusion von geschmolzenem Thermoplast verwendet werden, als auch als Pasten-/Gel-Extruder für den Druck von Lebensmitteln oder das Bioprinting.

## 3D-Drucker mit kartesischem System

Der allererste 3D-Drucker für Verbraucher (der RepRap *Darwin*, in Abbildung 10.1 gezeigt) verwendete FFF/FDM, um Objekte aus geschmolzenem Thermoplast zu erzeugen, das zuvor zu Fäden geformt worden war. Die Fäden konnten dem Hot-End, also dem »heißen Ende« des Extruders stetig zugeführt werden, der den Kunststoff schmolz, um ihn schichtweise auszugeben und das massive Objekt zu formen. Man sagt manchmal auch, das neue Objekt *wächst*, obwohl es sich dabei bei den aktuellen RepRap-Systemen keinesfalls um einen biologischen Prozess handelt.



*Abbildung 10.1: Der Darwin-Drucker – der erste RepRap-3D-Drucker für Verbraucher*

Der Aufbau des Darwin-Druckers (und vieler seiner Varianten) erinnert an einen Portalkran, wobei der Extruder innerhalb eines starren Rahmens oberhalb der Aufbauplatte bewegt wird, die sich während der Entstehung des Objekts jeweils um eine Schicht absenkt. In seiner einfachsten Form trägt der Extruder geschmolzenes Thermoplast innerhalb eines durch die kartesischen Koordinaten für die X-, Y- und Z-Achsen definierten Bereichs auf (siehe Abbildung 10.2).



Das kartesische Koordinatensystem trägt den Namen seines Erfinders, des französischen Mathematikers und Philosophen René Descartes. Dieses System wird genutzt, um alle Positionen innerhalb eines dreidimensionalen Raums durch Messung des Abstands von einem Ursprungspunkt aus in drei Dimensionen anzugeben. Für einen 3D-Drucker stellt dieser Ursprungspunkt die Startposition des Extruders und der Aufbauplatte dar.

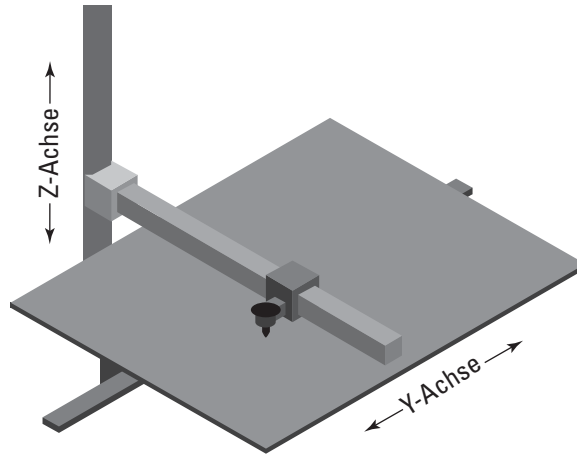


Abbildung 10.2: Ein 3D-Drucker im kartesischen Stil, der Objekte erzeugt, indem er seinen Extruder (das heiße Ende) in drei Dimensionen bewegt

Das in Abbildung 10.2 gezeigte Beispiel ist vergleichbar mit dem MendelMax-Design, das wir Ihnen in den Kapiteln 11 bis 15 zeigen werden. Dabei wird ein Extruder in der X-Achse entlang eines starren Rahmens bewegt, der entlang der Z-Achse jeweils um eine Schicht angehoben wird, während ein Motor die Bewegung der Y-Achse ausführt, indem er die eigentliche Aufbauplatte unterhalb des Extruders bewegt. Wie der ursprüngliche Darwin können andere kartesische Designs den Extruder innerhalb eines starren Portals bewegen, das Bewegungen entlang der X- und Y-Achse realisiert, während die Aufbauplatte jeweils um eine Höhenschicht abgesenkt wird und keine weiteren Bewegungen macht. Dieselbe Strategie wenden Polar-3D-Drucker an, die wir später in diesem Kapitel noch beschreiben.

Egal, ob die Aufbauplatte abgesenkt wird, oder ob der Extruderrahmen angehoben wird, das Gesamtvolumen des Druckers im kartesischen Format entspricht einem Quader mit den maximalen Achsenlängen als Kantenlängen, wie in Abbildung 10.3 gezeigt. Kartesische Systeme können ganz leicht vergrößert werden, indem der Rahmen verlängert und verstärkt wird und leistungsfähigere Motoren und Motorsteuerungen eingebaut werden.

Übergroße FFF/FDM-Thermoplast-Extrusionsdrucker sind häufig mit größeren Extruderdüsen ausgestattet, wodurch die Auflösung der einzelnen Schichten begrenzt wird, aber die Druckjobs schneller erledigt werden können.

Objekte, die über die Kapazität des Bauvolumens hinausgehen, können verkleinert werden, sodass sie in den verfügbaren Raum passen, oder sie können in Einzelteile aufgeteilt werden, die nach der Herstellung zusammengebaut werden. Für die Verbindung der Einzelteile können verschiedene Techniken angewendet werden, von Klammern und Magneten bis hin zu Gewindelöchern für Schrauben, wie in Abbildung 10.4 gezeigt. Und selbst herkömmliche Kleber oder Harze können verwendet werden, um 3D-gedruckte Teile zu verbinden, die das Bauvolumen des verfügbaren Druckers überschreiten.

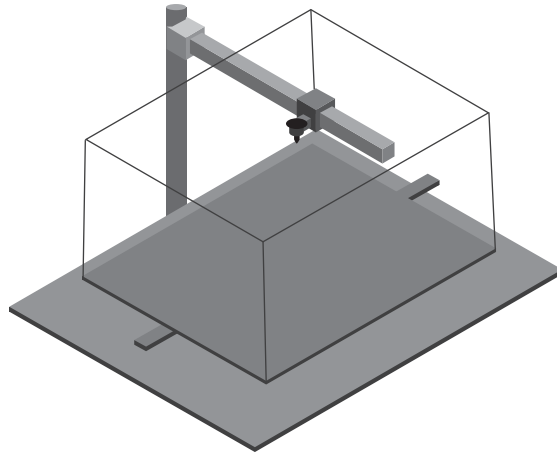


Abbildung 10.3: Das verfügbare Bauvolumen für einen kartesischen 3D-Drucker



Abbildung 10.4: Komponenten dieser nicht funktionalen 3D-gedruckten Feuerwaffe werden mit 3D-gedruckten Schrauben zusammengehalten, die in am Modell dafür vorgesehenen Gewindelöchern angebracht werden.

## Delta-Optionen

Eine weitere Strategie für die Erstellung von 3D-gedruckten Objekten basiert auf den Techniken für Delta-Roboter (die sich im 3D-Raum bewegen, indem sie Gestänge entlang separater paralleler Rahmenkomponenten bewegen). Bei dieser Technik basiert die Bewegung auf mehreren Rahmenschiene, die über Gestänge oder andere variable Konstrukte mit einem starren mittigen Extruder verbunden sind (wie in Abbildung 10.5 gezeigt). Durch die Bewegung an den Rahmenenden kann die (X-, Y-, Z-)Position des Extruders von der Steuerelektronik des Druckers mathematisch berechnet werden.

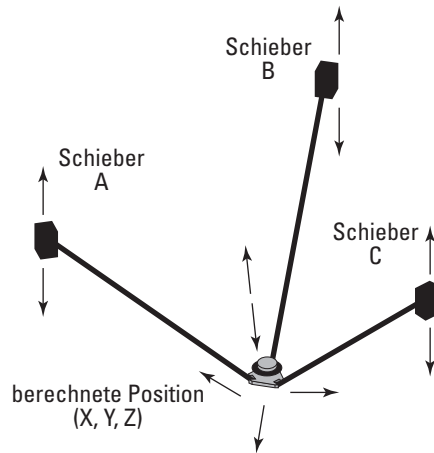


Abbildung 10.5: Wenn sich die Rahmenschieber in einem Delta-Drucker nach oben und unten bewegen, bewegt sich der Extruder in alle drei Bewegungsachsen

Beispiele für Delta-Drucker sind etwa der RostockMax, den wir in den Kapiteln 11 bis 15 bauen, sowie das in Abbildung 10.6 gezeigte eigene Design von Richard, der 3DR. (Der Drucker von Richard in den Farben des Union Jack ist ein Open Source-RepRap-Design, das er über GitHub geteilt hat und das über seinen privaten RichRap-Blog erhältlich ist.)

Delta-Drucker verwenden einfachere Rahmen als ihre kartesischen Verwandten, weil die Elektronik alle drei Bewegungen entlang der X-, Y- und Z-Achsen übernimmt. Für die Bewegung werden dieselben Motoren verwendet. Es gibt keine separaten Systeme für die unabhängige Bewegung des Extruders und der Aufbauplatte innerhalb eines starren Rahmens.

FFF/FDM-Drucker nutzen statt der Schwerkraft die Haftung zwischen den Schichten des geschmolzenen Thermoplasts, um nachfolgende Schichten auf den vorhergehenden Schichten zu halten, deshalb können bestimmte Designs auch von oben nach unten betrieben werden, ohne dass sich die Druckqualität verschlechtert. Dies wurde von der NASA bei Mikroschwerkraft getestet, indem ein FFF/FDM-Drucker auf der ISS in der Umlaufbahn um die Erde betrieben wurde.

Delta-Drucker werden manchmal als sehr »unterhaltsam« bezeichnet, weil sie ständig in Bewegung sind, wenn beispielsweise der Extruder angehoben oder abgesenkt wird, sich über



*Abbildung 10.6: Der Delta-Drucker 3DR von Richard Horne*

eine flache Ebene bewegt oder zwischen zwei Punkten in einem dreidimensionalen Raum bewegt wird. Das Bauvolumen ist beschränkt durch die Länge der Gestänge zwischen den Schiebern und der Extrudermontage. Das erstellte Objekt muss an seinem höchsten Punkt unter den Extruder und in die Stützrahmen passen. Obwohl es sich technisch gesehen um einen kegelförmigen Raum handelt, wird das Bauvolumen für die meisten Delta-Drucker als hoher Zylinder über der Aufbaufläche dargestellt, wie in Abbildung 10.7 gezeigt. Die gebauten Objekte müssen in das transparent dargestellte Zylindervolumen passen. Dabei wird ein Gestänge angenommen, das einen Zugriff über die Kanten des Kegels hinaus gestattet, aber viele Designs weisen ein etwas kleineres Bauvolumen auf, um die für die Verbindung der Schieber benötigten mechanischen Komponenten zu reduzieren.

Ein Delta-Drucker nutzt nicht seinen Rahmen, um das zunehmende Gewicht des gedruckten Objekts zu stützen, er kann also aus leichten Materialien konstruiert werden, wie beispielsweise Aluminium oder vor Ort verfügbaren Baumaterialien wie etwa Bambus. Wie alle RepRaps können auch Delta-Drucker mit FFF/FDM-Thermoplast-Extrudern am Hot-End ausgestattet werden (wie dem in Abbildung 10.8 gezeigten), oder mit Gel- oder Pasten-Extrudern, wenn sie für andere Zwecke genutzt werden sollen. Die Abbildung zeigt einen standardmäßigen FFF/FDM-Extruder mit *J-Kopf* für das Hot-End, der über den Schrittmotor des Extruders langsam mit Kunststoffaden befüllt wird. Die dickeren Drähte versorgen das Heizelement mit Strom, die dünneren Drähte melden die Temperaturwerte über einen kleinen Thermokoppler zurück an die Elektronik. Beide Drahtgruppen sind mit ursprünglich für Raumanzüge entwickeltem Polyimid-Klebeband am Hot-End gesichert.



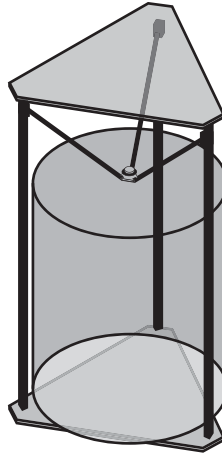


Abbildung 10.7: Das mögliche Bauvolumen für einen Delta-3D-Drucker



Abbildung 10.8: Ein standardmäßiger FFF/FDM-Extruder mit J-Kopf für das heiße Ende

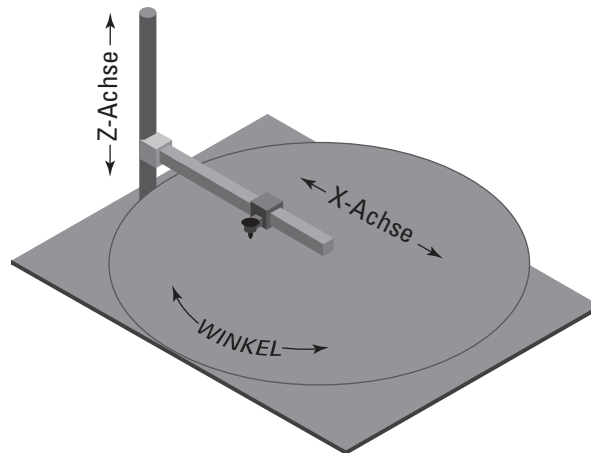
Abhängig vom Gewicht des Extruders und des Druckmaterials können Delta-Drucker über Zahnriemen, leichte Ketten oder sogar geflochtene Angelschnur gesteuert werden, die die einzelnen Schieber Elemente mit dem zugehörigen Motor verbinden.

## **Fertigung unter Verwendung von Polarkoordinaten**

Eine dritte Technik für die Bewegung des Extruders im dreidimensionalen Raum dreht entweder die Aufbauplatte oder die Halterung des Extruders um einen zentralen Punkt, um jeweils eine Schicht aufzubauen. Dieses Design basiert auf dem polaren Koordinatensystem, wie es die griechischen Astronomen und Astrologen beschrieben haben, und verwendet eine Drehung um einen festen Pol (wie das kartesische System) und die Messung des Abstands entlang eines Radius oder *Strahls* von diesem Pol aus in einem Winkel Theta ( $\theta$ ), um das Rotationsmaß darzustellen.

Wenn man die Position des Pols, den Winkel Theta und den Radius von einer Achse durch diesen Pol kennt, kann jeder Punkt in einer Ebene unter Verwendung des Polarkoordinatensystems definiert werden.

Abbildung 10.9 zeigt, wie ein realer Polar-3D-Drucker aussehen könnte – mit einer sich drehenden Aufbauplatte, über der ein Extruder von der Mitte ausgehend entlang eines Radiusstrahls bewegt wird. Eine vollständige Drehung des Objekts führt jedoch aufgrund der Nachschleppung des geschmolzenen Thermoplasts zu einer Verzerrung, wenn sich die Aufbauplatte um den Pol dreht. Andere Varianten platzieren den Extruderrahmen in der Mitte der Aufbauplatte, aber dafür sind kompliziertere mechanische Verbindungen erforderlich und die Nivellierung ist schwieriger.



*Abbildung 10.9: Ein 3D-Drucker mit echtem Polarsystem*

Eine vor Kurzem für den Gada Prize vorgelegte Arbeit verwendet ein Polarkoordinatensystem, wie es in SCARA-Robotern eingesetzt wird, die dieselbe Bewegung unter Verwendung eines mehrteiligen Arms ausführen, der sich um einen gemeinsamen Pol dreht (siehe Abbildung 10.10). Durch die Realisierung eines aus vier Segmenten bestehenden beweglichen Parallelogramms können sowohl die Strahlänge als auch der Winkel von dem zentralen Pol aus gesteuert werden, indem der Winkel geändert wird, dem das innere Segment folgt. Der 3D-Drucker nach dem SCARA-Design wurde von dem südafrikanischen Ingenieur Quentin Harley entwickelt, der dem RepRap den Namen *Morgan* gegeben hat.

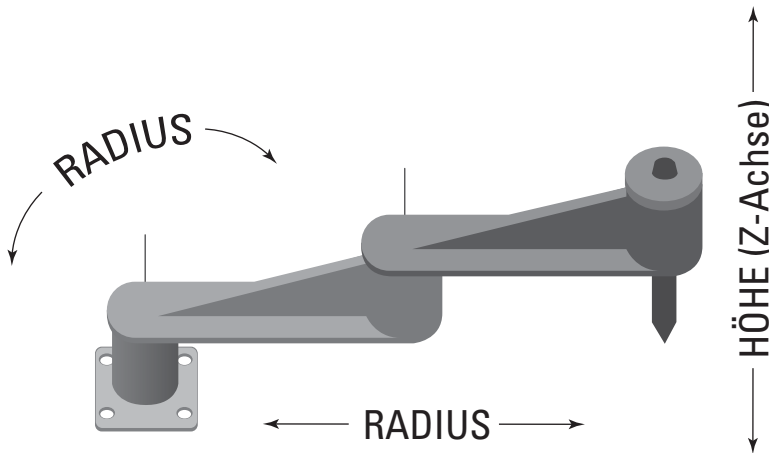


Abbildung 10.10: Der »Morgan« verwendet eine Extruderbewegung im Stil von SCARA-Robotern, wozu er einen aus zwei Segmenten bestehenden Arm verwendet.

Durch die Verwendung eines Gelenkarms und einer stabilen Aufbauplatte vermeidet dieses Design die Probleme eines echten Polarsystems, weil jeweils nur eine Schicht des Objekts aufgetragen werden muss – wie einige kartesische Systeme, bei denen es nicht notwendig ist, sich in einer vollständigen Kreisbahn um den Pol zu bewegen. Weil das gedruckte Objekt nur nach unten wächst und sich nicht dreht, entstehen keine Drehkräfte auf das Objekt. Deshalb wird aufgrund der Haftung des geschmolzenen Thermoplasts kein Drehmoment übertragen.

Um die Komplexität der mechanischen Stützelemente zu reduzieren, verwendet das Polar-design nach dem SCARA-System nur einen Teil des vollständigen Kreises um den zentralen Pol. Sein Bauvolumen ist in der Regel auf einen Halbkreis oder weniger beschränkt, womit Platz für eine Stütze an jeder Seite der Aufbauplatte ist (wie in Abbildung 10.11 gezeigt). Die gebauten Objekte müssen in das Volumen des Halbzylinders passen.

Harley lebt in Südafrika und konnte den Morgan RepRap unter Verwendung der unterschiedlichsten vor Ort verfügbaren Materialien bauen, obwohl es kaum Geschäfte für die benötigte Hardware gab. Momentan versucht er, die Kosten unter 100 Dollar für einen vollständigen

3D-Drucker einschließlich der Elektronik zu senken. Zum Zeitpunkt der Drucklegung dieses Buchs liegt er noch unmittelbar oberhalb dieser Kostenmarke. Einige der nicht druckbaren Komponenten (die sogenannten *Vitamine*) für den RepRap Morgan, wie beispielsweise die Rollschuhlager, Schrittmotoren und die Steuerelektronik, müssen immer noch zugekauft werden. Dennoch versucht die RepRap-Community ständig, 3D-druckbare und selbst angefertigte Alternativen für diese Komponenten zu entwickeln.

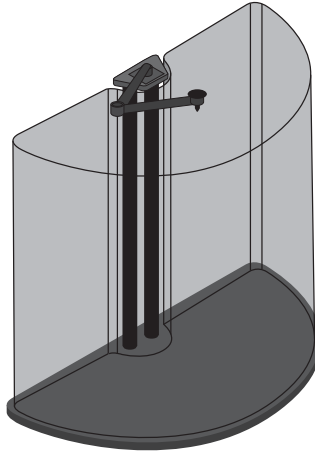
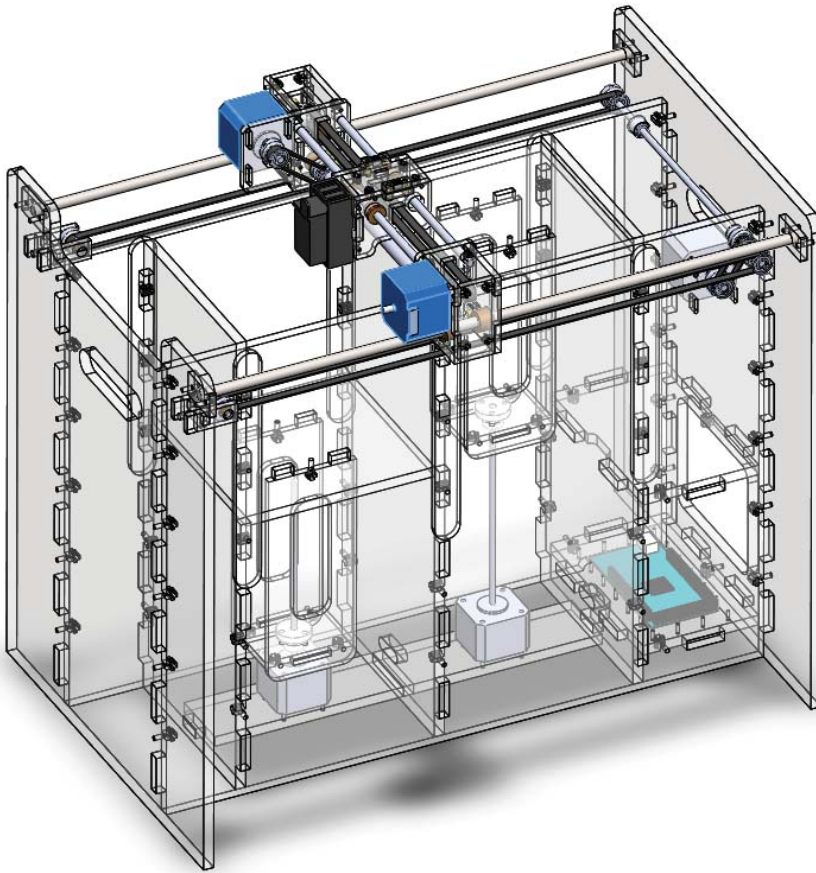


Abbildung 10.11: Das mögliche Bauvolumen für einen Polar-3D-Drucker nach dem SCARA-System

## In Entwicklung befindliche Varianten

Neben den FFF/FDM-Varianten des beliebten Open Source RepRap-Druckers gibt es noch viele andere erschwingliche Alternativen für private Anwender – vom Open Source Fab@Home Pasten- oder Gel-Extrusionsdesign bis hin zum proprietären Stereolithographiesystem (SLA) Form1. Von der Community entwickelte Open Source-Designs für Hardware und Software sind in zahlreiche Varianten für den Verbraucher eingeflossen, wie wir in Kapitel 11 noch genauer beschreiben werden.

Wenn demnächst mehrere Patente zur additiven Fertigung auslaufen, werden bereits zahlreiche Alternativen entwickelt worden sein. Ganze Legionen von Hobby-Designern entwickeln den Beispielbausatz weiter, den der Gründer des Open Source-RepRap-Designs, Adrian Bowyer, geschaffen hat. Bowyer ist Ingenieur und Mathematiker und hat zuvor an der Universität von Bath/Großbritannien gearbeitet. Während einige Patente für den grundlegenden Laser-Sintering-Prozess in Kürze ablaufen, wurden bereits Open Source-Alternativen zu anderen (proprietären) Designs erforscht, die eine granulare Bindung verwenden. Abbildung 10.12 zeigt ein Beispiel dafür, den Drucker Pwdr 1.



*Abbildung 10.12: Eine Darstellung des in Entwicklung befindlichen  
Open Source-3D-Druckers Pwdr mit Granulatbindung*

Das Open Source-Design von Pwdr basiert auf ganz normalen Tintenstrahldruckern, wobei ein Flüssigbinder auf ein feines Granulatpulver aufgetragen wird, der aus einem Fülltrichter bereitgestellt und auf eine Walze übertragen wird, um die Schichten nacheinander in der Aufbaukammer auf der anderen Seite zu erstellen. Die ursprüngliche Idee für dieses Design ist immer noch durch Patente geschützt, deshalb kann noch kein Pwdr-Bausatz oder -Drucker an Verbraucher verkauft werden, aber die Designer arbeiten bereits an einer perfekten Variante, die von Hobby-Anwendern nachgebaut werden kann, sobald die Patentbeschränkungen auslaufen.



# Ein RepRap für Sie



## *In diesem Kapitel*

- ▶ Ihren Bedarf analysieren
- ▶ Ein Design auswählen
- ▶ Druckmaterialien auswählen
- ▶ Wichtige Komponenten und Software identifizieren

---

**D**er RepRap ist eine wunderbare Maschine, die in der Lage ist, sich selbst zu replizieren. Es handelt sich dabei um einen kostengünstigen 3D-Drucker, der die meisten seiner Komponenten selbst drucken kann. Für Anfänger im Bereich des 3D-Drucks stellt er die optimale Ausgangsposition dar. In den nächsten Kapiteln werden wir Ihnen zeigen, wie Sie Ihren eigenen RepRap-3D-Drucker bauen.

Der erste Schritt zum Bau Ihres eigenen RepRap-3D-Druckers ist die Auswahl eines Designs. Wenn Sie noch nicht viel selbst gebaut haben, kann dies der schwierigste Schritt sein. Es gibt hunderte RepRap-Maschinen und unzählige Varianten davon, wo also sollten Sie anfangen und was ist das beste Design für Sie?

In diesem Kapitel betrachten wir zunächst verschiedene RepRap-3D-Drucker und versuchen festzustellen, welches Gerätedesign für Sie am besten geeignet ist.

Außerdem beschäftigen wir uns mit den verschiedenen Materialien, die Sie in einem 3D-Drucker für Verbraucher nutzen können, und sprechen über die Einzelkomponenten eines 3D-Druckers, die Sie unbedingt kennen müssen, wenn Sie eine Maschine aus einem Bausatz bauen.

## *Ihre Anforderungen an einen 3D-Drucker*

Wenn Sie ein Design für Ihren ersten 3D-Drucker auswählen, sollten Sie zunächst überlegen, was Sie damit machen wollen. Fragen Sie sich, wofür Sie einen 3D-Drucker brauchen. Und was Sie von ihm erwarten. Häufig wissen Sie das nicht so genau – Sie wollen einfach einen. Diese Antwort ist völlig in Ordnung. 3D-Drucker sind eine hochinteressante neue Technologie und es macht einfach Spaß, sich damit zu beschäftigen.

Eine andere häufige Antwort ist, dass damit 3D-gedruckte Teile erstellt und verkauft werden sollen. Damit rechtfertigen viele Leute einfach das Geld und die Zeit, die sie in eine Maschine investieren, die natürlich weitere Maschinen herstellen kann. Hier ein Wort zur Vorsicht: Es wird ein wenig dauern, bevor Ihre Ergebnisse so gut sind, dass Sie sie verkaufen können, aber das Ziel ist in Ordnung, weil es zum einen Sie selbst weiterbringt und zum anderen dafür sorgt, dass es wirklich überall auf der Welt RepRaps gibt.



## ***Brauche ich einen RepRap oder einen anderen Drucker?***

Anschließend sollten Sie herausfinden, ob Sie einfach irgendeinen 3D-Drucker oder einen RepRap wollen. Diese Unterscheidung ist sehr wichtig. Aufgrund der Nachfrage nach 3D-Druckern haben viele Unternehmen auf der RepRap-Technologie aufgebaut, um Maschinendesigns als Massenware zu produzieren. Es ist pure Ironie, dass der Erfolg einer kostengünstigen selbstreplizierenden Maschine einen so hohen Bedarf geschaffen hat, dass die Hersteller diesem nur nachkommen können, indem sie einige Teile in einer Massenproduktion herstellen. Damit entstehen jedoch auch Probleme für die Kunden: Wenn Sie die Teile für Ihre Maschine nicht selbst ausdrucken können, können Sie keine Upgrades und keine Reparaturen durchführen und die Selbstreplikation ist nicht möglich.

Das Ganze ist kein Problem, wenn Sie einfach nur einen 3D-Drucker wollen und auf die selbstreplizierende Natur des RepRap verzichten können. Es gibt zahlreiche erschwingliche Maschinen, die fast alle von einer RepRap-Variante ausgehen oder seine Kerntechnologie verwenden. Einige bezeichnen sich selbst noch als RepRap, während andere versuchen, ihre Wurzeln zu verbergen.

Der RepRap steht immer noch an erster Stelle, weil er ein Upgrade für sich selbst erzeugen kann. Andere Drucker, die hauptsächlich aus per Laser ausgeschnittenen Teilen, vorgefertigten Rahmen oder allgemeinen Spritzgussteilen bestehen, können auch die Teile für einen RepRap ausdrucken, auch wenn sie keine Teile ausdrucken können, um sich selbst zu replizieren. Damit wird die RepRap-Technologie noch fruchtbarer und andere Maschinen werden steril und riskieren eine stetige Veralterung. Es ist also offensichtlich, dass jeder in den letzten 30 Jahren hergestellte 3D-Drucker dazu beitragen kann, den RepRap noch größer und noch besser zu machen. Selbst die massengefertigten Maschinen aus den vergangenen Jahren tragen zu den großen Zielen des Projekts bei.

Ich will Ihnen *nicht* einreden, einen anderen als einen RepRap-Drucker zu kaufen. Ich möchte nur, dass Sie darüber nachdenken, wofür Sie einen 3D-Drucker brauchen, und ob die Vorteile des RepRap diejenigen der anderen Optionen überwiegen.

RepRap ist ein Open Community-Projekt und seine Technologie bildet die Grundlage für fast alle neuen 3D-Drucker für den privaten Anwender. Der RepRap bleibt jedoch durch seine Vielfalt dynamisch und ist immer einen Schritt voraus – dank der riesigen Menge an Benutzern und Entwicklern in seiner Community.

Einer der wichtigsten Vorteile des RepRap ist die Kontrolle, die er Ihnen bietet. Es gibt täglich Änderungen, Upgrades und Verbesserungen am RepRap, die Privatpersonen und Unternehmen auf der ganzen Welt entwickeln. Fast jede Verbesserung oder Erweiterung, die Sie sich nur vorstellen können, wurde bereits durch irgendeinen Entwickler für den RepRap implementiert, der Ihnen diese Technik möglicherweise zur Verfügung stellen wird.

Das gilt nicht nur für Verbesserungen an der Maschine. Sie finden auch überall Upgrades für die Software und die Firmware der Maschine (Firmware ist die Software, die in der Elektronik des Druckers ausgeführt wird). Diese Updates können Ihnen helfen, stetige Frustration zu

vermeiden. Viele Hersteller von Druckern für Verbraucher legen die Einstellungen für ihre Drucker vorab definitiv fest, sodass Sie nur mit einem bestimmten Material oder mit einer bestimmten Geschwindigkeit und bestimmten Qualitätseinstellungen drucken können. Bei einem RepRap-Drucker können Sie mit einfachen Einstellungen drucken, aber auch fast jeden Aspekt der Maschine abändern. Diese Flexibilität wird dann wichtig, wenn Sie versuchen, abenteuerliche Objekte zu schaffen oder mit neuen oder unüblichen Materialien zu drucken.

Natürlich braucht nicht jeder so viel Kontrolle. Aber fast jeder schätzt die Freiheit, die diese Flexibilität bietet. Mit einem RepRap sind Sie nicht auf die zufälligen Einstellungen eines Herstellers beschränkt. Die einzige Grenze ist Ihre eigene Fantasie.

### *Kaufe ich einen fertigen 3D-Drucker oder einen Bausatz?*

Soll ich einen fertigen 3D-Drucker oder einen Bausatz kaufen? Um diese Frage zu beantworten, denken Sie noch einmal darüber nach, wofür Sie den 3D-Drucker brauchen. Wenn Sie ihn als Werkzeug benutzen wollen und es nur auf die Ausgabe ankommt, ist eine im Handel erhältliche Maschine mit Support und Schulung wahrscheinlich die richtige Wahl für Sie. Das ist teurer und wird Sie (wie bereits erwähnt) in gewisser Weise einschränken, was Ihre Möglichkeiten mit der Maschine betrifft. Außerdem ist es schwieriger, Unterstützung von einer Online-Community zu erhalten, weil die meisten Anwender keine im Handel erhältlichen Maschinen benutzen und deshalb auch wenig Erfahrung damit sammeln, die sie weitergeben könnten. Außerdem ist die Unterstützung eher Sache des Unternehmens, das Ihnen die Closed Source-Maschine verkauft hat.

Ich empfehle immer, einen Bausatz zu kaufen oder (wenn Sie mutiger sind) alle Teile selbst zu beschaffen. In dieser Entwicklungsphase ist dies die beste Lösung. Diese Maschinen sind noch weitgehend mechanisch, die Teile unterliegen also einem gewissen Verschleiß und müssen sorgfältig kalibriert werden. Im Laufe seines Lebens wird Ihr 3D-Drucker alle möglichen Probleme verursachen, die Ihre Druckerarbeiten stören. Diese Probleme können aber mit jedem 3D-Drucker auftreten, unabhängig davon, was er kostet. Das liegt einfach in der Natur der Technik. Aus diesem Grund ist es besser, eine eigene Maschine zu bauen und genau zu wissen, wie die einzelnen Teile zusammenarbeiten, aus denen Ihr 3D-Drucker besteht. Wenn Sie Ihre Maschine selbst gebaut haben, können Sie sie sehr viel besser reparieren und warten. Und das ist nicht so schwer, wie Sie vielleicht glauben.



Machen Sie sich keine Gedanken. Einen 3D-Drucker aus einem Bausatz zu bauen, ist wirklich nicht so schwierig, wie es sich anhört. Fast alle Bausätze enthalten fertige Elektronik und Verdrahtung, Sie brauchen also nur den mechanischen Rahmen zusammenzubauen, die Teile zu messen und mit Schrauben und Muttern zu montieren und dann alle Stecker der Steuerungsplatine anzuschließen. Wenn Sie dabei sorgfältig vorgehen und den Anweisungen folgen, kann dies eine sehr wertvolle Erfahrung darstellen.



Die RepRap-Community wird täglich größer und kommuniziert auf die unterschiedlichsten Arten. Wenn Sie Rat brauchen, schließen Sie sich am besten einer Gruppe Gleichgesinnter vor Ort an. Sie werden sehr viel lernen müssen, aber das Ganze ist die Mühe wert. Innerhalb kürzester Zeit werden Sie sich mit der Technologie auskennen und können eigene Anpassungen für die RepRap-Community entwerfen.

## Offen, geschlossen und unter Lizenz

RepRap ist ein Open Source-Projekt – und das musste es von Anfang an sein, denn der Versuch, eine Maschine zu beschränken oder zu verbieten, die einen maßgeblichen Teil von sich selbst duplizieren kann, ist eine fast unmöglich zu erfüllende Aufgabe. Die offene Natur des RepRap stellt einen großen Vorteil für die gemeinsame Arbeit der riesigen Gemeinschaft an Herstellern, Designern und Benutzern dar. Dieser offene Charakter bedeutet nicht, dass das Projekt eine reine Hobby-Angelegenheit wäre oder dass es nicht auf Closed Source-Maschinen genutzt werden könnte. Genau das Gegenteil ist der Fall – solange die genutzten Lizenzen beachtet werden.



Trotz der Tatsache, dass RepRap Open Source ist, erfolgt die Verwendung fast der gesamten RepRap-Technologie, die Ihnen bereitgestellt wird, immer noch unter einer Lizenz. Das muss unbedingt beachtet werden – es könnte von größter Bedeutung sein, wenn Sie vorhaben, Geld mit dem 3D-Druck zu verdienen oder die Arbeit anderer Menschen in diesem Bereich zu nutzen.

Eine typische Hardware- oder Software-Lizenz gibt vor, was Sie mit den bereitgestellten Dateien machen dürfen. Der Kern des RepRap-Projekts fällt unter die Gnu General Public License. Insgesamt bedeutet das, dass die Dateien kostenlos sind und dass jeder sie nutzen darf.

Die Gnu General Public License wurde speziell für Open Source-Software geschaffen. Die Verwendung von Gnu für Hardware-Projekte ist möglich, aber nicht ideal. Diese Einschränkung liegt an der Tatsache, dass Hardware-Projekte eine physische Präsenz haben, die außerhalb des Kontexts des ursprünglichen Projekts gezeigt oder wiederverwendet werden kann, ohne gleichzeitig einen offensichtlichen Hinweis auf das Original zu zeigen.

Aus diesem Grund werden viele der Hardware-Elemente für RepRap sowie die zugehörigen 3D-Designs oder die unterstützende Elektronik jetzt unter einer Creative Commons License lizenziert. Beispielsweise befindet sich im Herzen der meisten RepRap-3D-Drucker eine Arduino-Elektroniksteuerkarte. Diese fantastischen modularen Elektronikgeräte werden für alle möglichen Steuerungsprojekte und industrielle Aufgaben auf der ganzen Welt verwendet.

Arduino-Controller sind Open Source-Hardware und -Software, lizenziert für die Verwendung unter der Creative Commons Attribution Share Alike-Lizenz. Diese Konfiguration gestattet die private und die gewerbliche Nutzung, aber Sie müssen die Dateien auf dieselbe Weise bereitstellen wie Arduino und Arduino in der Dokumentation Ihres Designs oder bei Änderungen erwähnen.

Eine typische Creative Commons-Lizenz verwendet verschiedene Symbole als Logo, um zu kennzeichnen, worum es sich handelt, und was gesetzlich damit erlaubt ist. Die in Abbildung 11.1 gezeigte Creative Commons-Lizenz (CC) beispielsweise gestattet Ihnen, die davon abgedeckte Arbeit zu kopieren, zu verteilen und zu übertragen, die Arbeit anzupassen und sie gewerblich zu nutzen.



Abbildung 11.1: Symbol für eine typische Creative Commons-Lizenz

In diesem Logo bedeutet die kleine Person in einem Kreis, dass die Lizenz nur unter der Bedingung erteilt wird, dass Sie die Arbeit wie vom Autor oder Lizenzgeber zuordenbar halten – außerdem darf diese Zuordnung nicht auf eine Weise erfolgen, die vermuten lässt oder impliziert, dass der Autor Sie oder die Verwendung Ihrer Arbeit empfiehlt.

Das SA-Symbol steht für *share alike*, das heißt, alle abgeleiteten Arbeiten müssen unter derselben Lizenz weitergegeben werden. In diesem Fall darf die abgeleitete Arbeit auch gewerblich genutzt werden. Beispielsweise ist es Ihnen nicht gestattet, diese Arbeit zu übernehmen, darauf basierend zu arbeiten und dann eine nicht-gewerbliche Lizenz dafür auszustellen, um zu verhindern, dass wiederum andere darauf aufbauen.

Ein weiteres häufig vorkommendes Beispiel, das demonstriert, wie diese Lizenz funktioniert, ist ein Originaldesign eines 3D-Modells. Hier will der Designer möglicherweise, dass die Dateien für die Nutzung durch Privatpersonen bereitgestellt werden, aber gleichzeitig die Nutzung des Modells für einen gewerblichen Nutzen einschränken und womöglich sogar auf dem Design basierende abgeleitete Arbeiten verbieten. Diese Konfiguration erlaubt Ihnen noch, das 3D-Modell herunterzuladen, es auszudrucken und zu benutzen, aber die Lizenz gilt nur für Ihre eigene private Nutzung.

Das Logo in Abbildung 11.2 spezifiziert, dass die Arbeit geteilt werden darf, dass die Lizenz aber nicht für eine gewerbliche Nutzung (NC) erteilt wird, und dass auch keine Ableitungen (ND) davon gestattet sind. Wenn Sie die Arbeit teilen, müssen Sie sie dem Ersteller oder Lizenzgeber zuordenbar machen.

Wenn Sie ein 3D-Modell unter dieser Lizenz erhalten, dürfen Sie keine 3D-gedruckte Version des Modells verkaufen, das Design nicht abändern, um es ebenfalls zu veröffentlichen, und die Designdateien für das Modell nicht verkaufen.

Sie *dürfen* das Modell ausdrucken und ausstellen, wenn Sie eine Genehmigung des Autors dafür einholen und den Autor darauf hinweisen, wenn Ihnen das Design oder der Ausdruck des Modells dabei hilft, etwas anderes zu verkaufen, wie beispielsweise einen 3D-Drucker, auf dem

das lizenzierte Modell gedruckt wurde. Wenn Sie dies tun, müssen Sie unbedingt dafür sorgen, dass das Design dem Designer zuordenbar ist, den lizenzierten Namen des Modells angeben und die Lizenz anzeigen. Auf diese Weise handeln Sie konform zu den Lizenzbestimmungen und das Modell wird dem Designer zugeordnet, was jeder sehen kann, der das ausgedruckte Objekt sieht.



*Abbildung 11.2: Ein weiteres Beispiel für ein Creative Commons-Symbol mit mehr Einschränkungen im Hinblick auf die gewerbliche Nutzung*

Wenn Sie diese Zuordnung nicht gewährleisten, bricht das Lizenzsystem zusammen und der Designer, dessen Arbeit auf diese Weise genutzt wurde, ist wahrscheinlich weniger bereit, sein nächstes Design mit Ihnen zu teilen (und ist vermutlich nicht besonders angetan von Ihrem Verhalten).

Sie sollten also immer auf die Art der Lizenzierung achten, unabhängig davon, ob Sie dafür etwas bezahlen mussten. Selbst wenn Sie etwas kostenlos erhalten haben, kann es noch gesetzliche Einschränkungen dazu geben, wie Sie es nutzen dürfen.

## **Auswahl eines 3D-Drucker-Designs**

Wenn Sie ein 3D-Drucker-Design auswählen, vergessen Sie nicht, einige der gebräuchlichsten RepRap-3D-Drucker in die Entscheidung einzubeziehen, die es bereits seit längerer Zeit gibt. Diese etablierten Designs dürfen keineswegs als alt oder veraltet eingeordnet werden, nur weil sie nicht mehr dem neuesten Stand der Technik entsprechen. Gehen Sie davon aus, dass sie stabile Ausgangspositionen und damit eine kluge Wahl darstellen. Sie können Ihr Sprungbrett für zukünftige Abenteuer innerhalb dieser neuen industriellen Revolution sein. Alle hier beschriebenen 3D-Drucker basieren auf etablierten Technologien und werden in der Community sehr häufig genutzt. Und sie alle sind geeignet, Ihr erster 3D-Drucker zu werden.

### **RepRap-Designs**

Die spezielle Natur des RepRap basiert auf dem Prinzip des »Survival of the Fittest« (dem Überleben der bestangepassten Exemplare). Viele Designs, Änderungen und Upgrades werden also nicht mehr verwendet oder durch evolutionäre Änderungen verdrängt, die von Benutzern und anderen Entwicklern übernommen wurden. Die Open Source Hardware-Plattform lässt uns beobachten, wie ein RepRap-Design wächst und sich ändert – und vielleicht irgendwann

ausstirbt. Die folgende Liste beschreibt die gebräuchlichsten Designs für RepRap-3D-Drucker in ungefährer chronologischer Reihenfolge, aber auch diese Designs unterliegen ständigen Upgrades und Innovationen:

- ✓ **Mendel:** Der originale Mendel-Drucker wurde von Ed Sells an der Universität Bath in Großbritannien entworfen. Als Nachfolger begann sich der Darwin-Drucker an verschiedenen Universitäten auf der ganzen Welt zu replizieren. Mendel hat einen neuen Standard für RepRap-Drucker gesetzt, der heute noch in vielen abgeleiteten Geräten verwendet wird. Das Mendel-Konzept nutzt kartesische Koordinaten, ähnlich wie viele aktuelle 2D-Drucker oder Plotter. Wie in Kapitel 10 beschrieben, bewegen die meisten auf kartesischen Koordinaten basierenden Geräte das Druckbett entlang der Y-Achse vor und zurück und die Druckdüse von links nach rechts entlang der X-Achse und senken die gesamte X-Achse und die Druckdüse entlang der Z-Achse ab bzw. heben diese an (in der Regel mit zwei Motoren, an jeder Seite einen). Der originale Mendel-Drucker wird heute als zu kompliziert in der Konstruktion betrachtet, aber es gibt beliebte moderne Versionen des Mendel, die einen großen Anteil der von Benutzern gebauten RepRap-3D-Druckern ausmachen.
- ✓ **Prusa Mendel:** Der am häufigsten gebaute und genutzte RepRap 3D-Drucker ist der Prusa Mendel mit zahlreichen Derivaten. (Abbildung 11.3 zeigt einen modifizierten Prusa Mendel.) Dieses Gerät, das von Josef Prusa entworfen wurde, war eine vereinfachte Version des ursprünglichen Designs von Mendel. Die Prusa-Version erwies sich aufgrund ihrer Einfachheit als sehr populär. Version 2 des Prusa Mendel wird heute noch gebaut und ist als erstes Gerät sehr zu empfehlen.
- ✓ **Mendel90:** Dies ist eine Variante des Mendel-Designs mit starrem Rahmen, in der Regel aus Holzkannteilen und Plexiglas oder einem laminierten Verbundmaterial als wichtigste tragende Elemente (statt der herkömmlichen RepRap-Gewindestangen, die bei den Prusa-Geräten verwendet werden). Das Gerät verwendet fast nur 3D-gedruckte Teile, bis auf den Hauptrahmen, der häufig aus einem Verbundstoff aus Aluminium und Kunststoff hergestellt wird. Mendel90 wurde von Chris Palmer entworfen. Chris, auch als Nophead bekannt, gehört seit Beginn an zum RepRap-Team und stellt unzählige Informationen über RepRap und 3D-Druck in seinem HydraRaptor Blog bereit (<http://hydraraptor.blogspot.com>). Dieses Blog ist unverzichtbar für alle, die die Geschichte des 3D-Drucks, Herausforderungen, Erfolge und Fehlschläge wirklich verstehen wollen (siehe Abbildung 11.4).
- ✓ **Prusa i3:** Der Prusa i3 ist ein Hybrid-Design, das Elemente von Mendel90, Wallace und anderen kombiniert, um einen einfach zu bauenden, hochqualitativen 3D-Drucker zu schaffen. Version 3, auch als *i3* bezeichnet, ist eine überarbeitete Variante von Mendel, vom Konzept her Mendel90 ganz ähnlich, aber mit einem starren zentralen Rahmen aus Holz, Plexiglas oder Aluminium und Gewindestangen, die das bewegliche Druckbett an der Y-Achse stützen (siehe Abbildung 11.5). Die Z-Motoren sind ebenfalls an der Basis angebracht, wie beim Mendel90, weil damit eine Bewegung der Z-Achse mit einem flexiblen Koppler möglich ist, wodurch Ihre Drucke ultraglatte Seitenflächen erhalten. Eine zu starke Verformungssperre an der Z-Achse bei vorherigen V2-Designs hat häufig zu einem Z-Anschlag geführt, was dann am gedruckten Objekt Streifen oder Rillen hinterlassen hat. Wir werden in Kapitel 12 genauer auf diese Maschine eingehen.



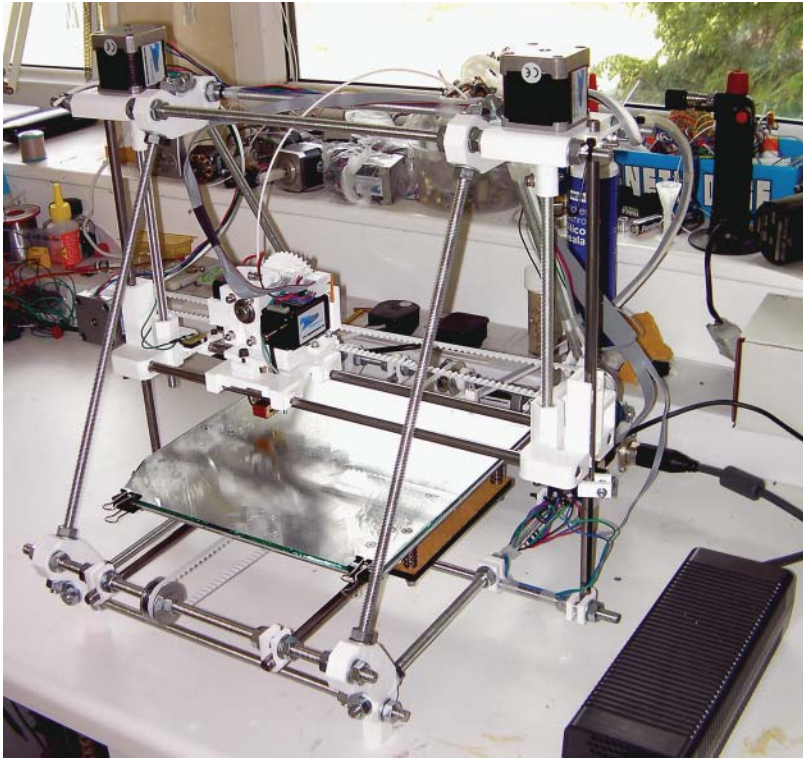


Abbildung 11.3: Prusa V2 RepRap-3D-Drucker  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von Adrian Bowyer)

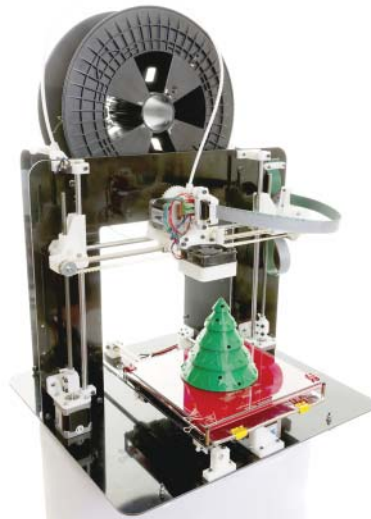


Abbildung 11.4: Ein Mendel90 RepRap-3D-Drucker  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von Chris Palmer)



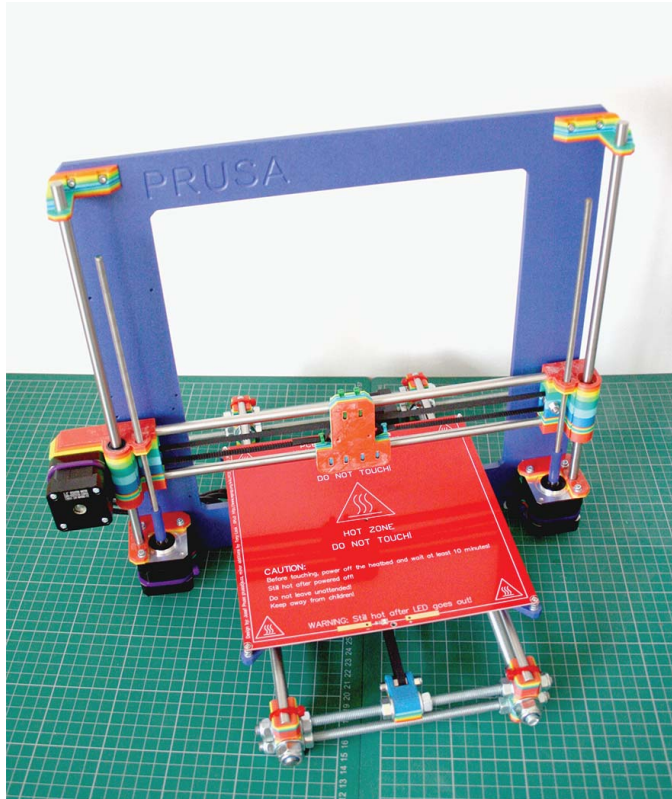
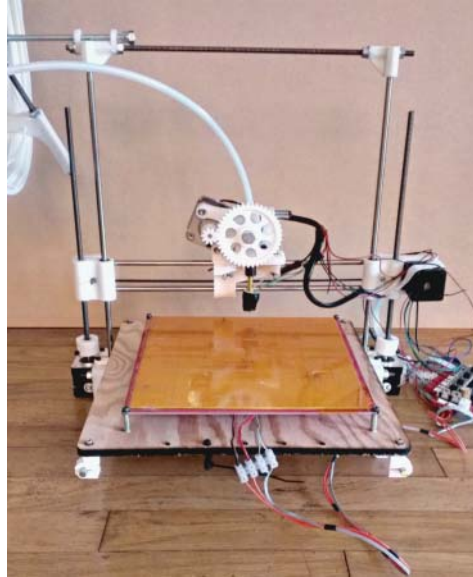


Abbildung 11.5: Der Prusa i3 3D-Drucker

- ✓ **Huxley:** Huxley kann als verkleinerte Version des Mendel betrachtet werden, die hauptsächlich kleinere Komponenten verwendet – Gewindestangen mit 6 mm für den Rahmen statt mit 8 mm, ebenso wie kleinere gedruckte Teile. Das Bauvolumen ist ebenfalls kleiner, aber für viele Anwendungen durchaus ausreichend. Außerdem ist dieses Design wunderbar portabel. Die erste Huxley-Maschine wurde ebenfalls von Ed Sells an der Universität Bath entwickelt. Huxley war ein inoffizielles Projekt, bis es Adrian Bowyer anvertraut und dann als offizieller RepRap-Drucker veröffentlicht wurde. Bei seiner Einführung war er nicht ganz so beliebt wie sein großer Bruder Mendel, weil viele Anwender versuchten, ihren ersten 3D-Drucker selbst zu bauen und sich deshalb für das ausgereifere Design des Prusa Mendel entschieden. Der Huxley wurde von Jean-Marc Giacalone überarbeitet und mutierte zum eMaker Huxley, der sich gut verkaufte und zu einem der beliebtesten Bausätze auf dem Markt wurde.
- ✓ **Wallace/Printrobot:** Wallace (siehe Abbildung 11.6) und der Printrobot verwenden eine ähnliche Konfiguration. Allerdings kann nur Wallace als echter RepRap betrachtet werden, weil seine Teile ausgedruckt werden können. Die Fähigkeit des Printrobot zur Selbstreplikation ist eher eingeschränkt, weil ein Rahmen aus Holzkanteilen dafür erforderlich



*Abbildung 11.6: Ein RepRap Wallace-Drucker von Rich Cameron als RepRap 3D-druckbare Version des minimalistischen Designs im Stil des Printrbot*

ist. Dennoch gestattet dieser Ansatz die Herstellung sehr kostengünstiger Bausätze und fertiger Maschinen, die zum Teil speziell für Lehrzwecke entworfen wurden.

Der Open Source Printrbot Jr V2-Drucker von Brook Drumm beispielsweise basiert auf RepRap-Technologie und ist aus Sperrholzteilen gebaut. Aufgrund des in Massenfertigung hergestellten Rahmens handelt es sich dabei um eine der kostengünstigeren Varianten eines 3D-Druckers für den Hausgebrauch. Seine erstklassigen Bewegungselemente verbessern außerdem die Druckausgabe (siehe Abbildung 11.7).

Der Printrbot kann keinen neuen Printrbot ausdrucken. Sein komplizierter, ineinandergreifender Rahmen, der per Laser ausgeschnitten wird, ist auf die Herstellung mithilfe von CNC-Maschinen oder eines Laserschneidgeräts ausgelegt. Er kann nicht einfach von Hand reproduziert werden. Wallace dagegen kann einen Großteil seines eigenen tragenden Rahmens replizieren und benötigt nur ein einfaches ausgeschnittenes Quadrat als Druckbett. Das ist der Unterschied beim RepRap-Konzept: Sie lassen den Drucker die komplizierten Teile drucken und die restlichen Teile können unter Verwendung von Standardwerkzeugen ganz einfach selbst gemacht werden.

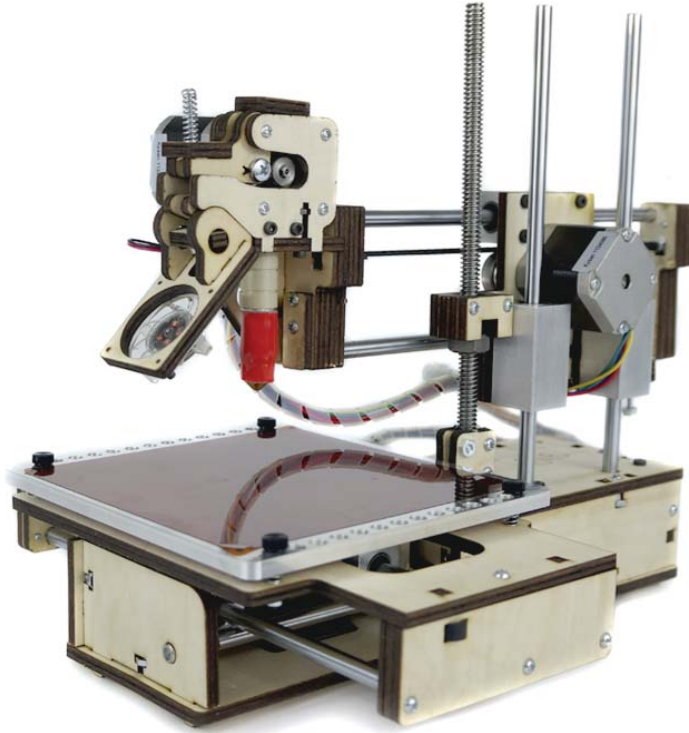


Abbildung 11.7: Der Open Source-Drucker Printrbot Jr V2

### 3D-Drucker-Bausätze für den Privatgebrauch

Wenn Ihnen die RepRap-3D-Drucker nicht gefallen, können Sie auf eine riesige Menge an 3D-Drucker-Bausätzen für den Privatgebrauch ausweichen, wie beispielsweise den Printrbot. Die 3D-gedruckten Teile werden einfach durch gefräste, ausgeschnittene oder ausgestanzte Teile ersetzt. Ob Sie einen Bausatz mit vielen vorgefertigten 3D-Drucker-Teilen oder einen Bausatz mit wenigen Teilen verwenden, ist letztlich von Ihrem Budget und Ihren persönlichen Vorlieben abhängig. Die Bausätze verwenden alle dieselbe RepRap-Elektronik, Firmware und Software, und alle sind in der Lage, mit ein bisschen Sorgfalt und Kalibrierung vergleichbare hochqualitative Druckergebnisse zu erzielen.

In Kapitel 13 betrachten wir RepRap-basierte Drucker, die sowohl 3D-gedruckte Teile und Gewindestangen als auch ausgeschnittene oder gefräste Rahmen verwenden. Außerdem beschäftigen wir uns mit Druckern mit kartesischem Koordinatensystem wie MendelMax V2 und Prusa i3, sowie mit Delta-Modellen wie dem RostockMax und 3DR.



Es gibt unendlich viele Varianten von 3D-Druckern mit kartesischem Koordinatensystem. Alle 3D-Drucker aus der folgenden Liste erzeugen hervorragende Druckergebnisse. Sie alle sind als Bausatz verfügbar oder können anhand einer Anleitung aus selbst beschafften Einzelteilen zusammengebaut werden.

Die folgende Liste beschreibt einige der beliebtesten 3D-Drucker für den Hausgebrauch, die als Bausätze angeboten werden:

- ✓ **MendelMax V2:** Diese Maschine hat sich in verschiedenen Versionen weiterentwickelt, wobei ursprünglich viele 3D-gedruckte Teile verwendet wurden, während jetzt eher per Laser ausgeschnittene oder gefräste Teile verwendet werden. Das V2-Modell wird in Kapitel 12 genauer beschrieben.
- ✓ **Ultimaker:** Dieser 3D-Drucker, der ebenfalls auf der RepRap-Technologie basiert, war eine der ersten als Bausatz angebotenen Maschinen (siehe Abbildung 11.8). Er verwendet per Laser ausgeschnittene Holzplatten, aus denen ein kastenartiger Rahmen erstellt wird, und seine Konfiguration ist vergleichbar mit derjenigen des frühen RepRap Darwin: Das Druckbett bewegt sich nur nach oben und unten und ein leichter Druckkopf bewegt sich entlang der X- und Y-Achsen. Der Ultimaker ist jedoch kein Darwin: Es ist ein sehr schneller Drucker, der einen *Extruder mit Bowdenzug* verwendet. Bei dieser Methode der Kunststoffextrusion wird die Masse des Motors und des Fadenfördersystems an eine

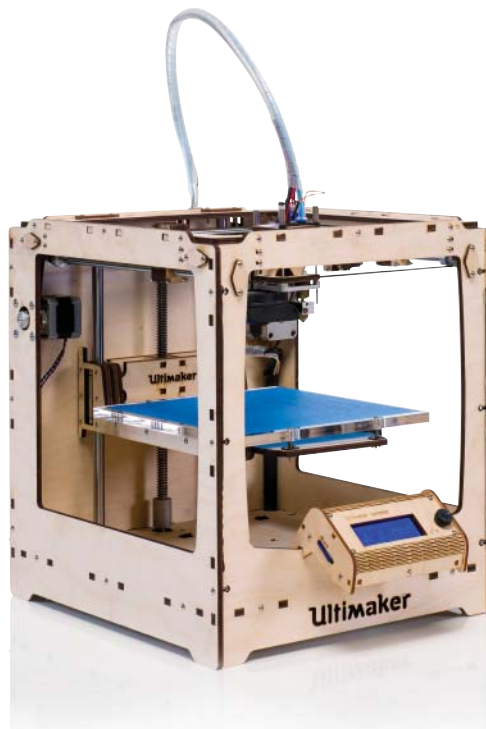


Abbildung 11.8: Der Ultimaker 3D-Drucker

statische Position der Maschine bewegt. Anschließend gelangt der zu extrudierende Faden in eine glatte auf PTFE (Teflon) basierende Röhre, die dafür sorgt, dass sich der Faden nicht biegt, verkrümmt oder komprimiert wird. Auf der anderen Seite dieser Röhre (die in der Regel ca. 500 mm lang ist) befinden sich der bewegliche Druckkopf und das Hot-End (das »heiße Ende«), das den eingehenden Faden schmilzt, der vom entfernten Extruder nachgeschoben wird. Diese Konfiguration gestattet, dass sich der (jetzt sehr leichte) Druckkopf sehr schnell bewegt, womit ein schnellerer Druck und eine höhere Präzision erzielt werden können. Wir werden in den nachfolgenden Abschnitten noch genauer auf Drucker mit Bowdenzügen eingehen.

- ✓ **Tantillus:** Dieser 3D-Drucker wurde ursprünglich als vollständig ausdrückbare Maschine entworfen. Tantillus ist vergleichbar mit einem Mini-Ultimaker. Ursprüngliche Versionen, die nicht den lasergeschnittenen Rahmen verwendet haben, wiesen den höchsten Prozentsatz an gedruckten Komponenten in einem RepRap-Drucker auf. Die Kastenrahmen-Konstruktion war ursprünglich vollständig 3D-gedruckt. Dieses Design hatte einen der größten Anteile 3D-gedruckter Komponenten aller RepRap-Drucker. Eine weitere Version mit einem Plexiglasgehäuse wurde als einfacherer Bausatz entworfen und vom Entwickler Sublime in einer Crowdfunding-Kampagne erfolgreich veröffentlicht. Eine seiner einzigartigen Funktionen ist die Verwendung einer sehr starken Angelschnur anstelle von Riemen, um die X- und Y-Bewegung zu realisieren, woraus sich eine sehr schnell bewegende Maschine mit hochqualitativen Drucken ergibt (siehe Abbildung 11.9).



Fast alle 3D-Drucker für den Privatgebrauch bieten in etwa dieselbe Qualität und Geschwindigkeit. Machen Sie sich also keine allzu großen Gedanken darüber, welches Modell Sie als Ihre erste Maschine auswählen. Das gilt vor allem für einen RepRap. Sie können jederzeit ein Upgrade vornehmen und das Design weiterentwickeln oder die meisten Teile für ein anderes oder ein zukünftiges Modell ausdrucken.

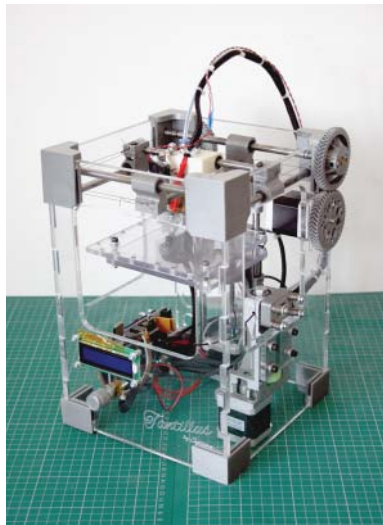


Abbildung 11.9: Der Tantillus 3D-Drucker

## Die experimentellen Designs

In der RepRap-Gemeinde gibt es ständig Tausende experimenteller Designs, die um die Welt gehen. Ab und zu entsteht eine völlig neue Variante. Diese neuen oder größtenteils neuen Maschinen ziehen in der Regel sehr viel Aufmerksamkeit auf sich und müssen möglicherweise von den anderen Entwicklern unterstützt werden, damit sie zu einer brauchbaren Alternative für die anderen Benutzer in der Community werden.

Solche Innovationen gehören zu den aufregendsten neuen Entwicklungen. Bei RepRap ist es nicht immer das Ziel, die Dinge noch schneller und noch präziser zu machen. Einige der schwierigsten Design-Herausforderungen entstehen, wenn darüber nachgedacht wird, wie noch kostengünstigere Materialien verwendet werden könnten, die noch mehr Menschen auf der ganzen Erde zur Verfügung stehen. Andere Innovatoren versuchen, völlig neue Anordnungen zu ersinnen, damit weniger Platz benötigt wird, während gleichzeitig große Objekte gedruckt werden können.

Alle Designs, die wir bisher betrachtet haben, verwenden das kartesische Koordinatensystem für die Positionierung. Die nächste Welle beliebter 3D-Drucker für den Privatgebrauch verwendet das Delta-Koordinatensystem für die Triangulation, wie in Kapitel 10 beschrieben.

Viele der erfolgreichsten 3D-Drucker-Varianten mit Delta-System stammen von einer Konzeptmaschine namens *Rostock*. Im erweiterten Design wird sie auch als *Kossel* bezeichnet. Sie wurde von Johann C. Rocholl entwickelt, der auch die Delta-Firmware-Variante Marlin geschrieben hat, die auf vielen RepRap-Delta-Druckern eingesetzt wird.

Hier die beliebtesten Designs für Delta-3D-Drucker:

- ✓ **RostockMax:** Dieses Design wurde von dem ursprünglichen Rostock inspiriert, verwendet aber einen Rahmen aus ausgeschnittenem Holz und neuerdings Lager, die auf Aluminiumauszügen laufen, um die lineare Bewegung der Maschine zu realisieren (siehe Abbildung 11.10). Außerdem handelt es sich um eine der größeren Maschinen, die Modelle beachtlicher Größe ausdrucken können. Wir werden den RostockMax-Bausatz in Kapitel 12 genauer betrachten.
- ✓ **3DR:** Richard hat einen alternativen Delta-Drucker entworfen, für dessen Aufbau hauptsächlich 3D-gedruckte Teile verwendet werden. Wir vergleichen in Kapitel 12 die Montage des 3DR mit der des Delta-3D-Druckers RostockMax.



Die meisten RepRap-Drucker können unterschiedlich groß gebaut werden, gehen Sie also nicht davon aus, dass die angegebene Druckgröße einer Maschine das von ihr gebotene Maximum ist. In der Regel wird ein Druckbereich von 200 Kubikmillimeter abgedeckt, aber RepRap-Maschinen können auf ein Vielfaches dieser Größe gebracht werden. Andere Drucker als die zur RepRap-Familie gehörenden sind größtenteils durch die Größe des per Laser ausgeschnittenen Rahmens begrenzt, der von einem Privatanwender normalerweise nicht ganz einfach vergrößert werden kann.



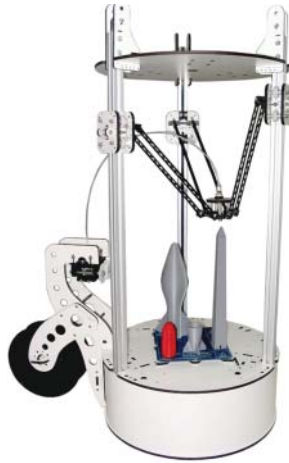


Abbildung 11.10: Ein RostockMax Delta-3D-Drucker von SeeMeCNC

## Weitere Maschinenkonstellationen

Wie in Kapitel 10 bereits erwähnt, können zahlreiche andere mechanische Konfigurationen genutzt werden, um einen Druckkopf im 3D-Raum zu positionieren. Andere Projekte unter der RepRap-Flagge verwenden ein auf SCARA basierendes System – dabei wird eine Komponente eingesetzt, die mit dem menschlichen Unterarm verglichen werden kann, ein- und ausklappbar, mit Gelenken und um einen Festpunkt drehend. Stewart-Plattformen, Polardrucker, Roboterarme und vollständige Bipod-Systeme sind weitere Beispiele für die vielfältigen Formen, die eine 3D-Druckmaschine annehmen kann.

## Auswahl des Druckmediums

Bei den meisten 3D-Druckern können Sie zwischen den unterschiedlichsten Materialien wählen. Noch mehr Auswahl erhalten Sie, wenn Sie mit Paste drucken, vorausgesetzt, Sie haben einen geeigneten Extruder dafür.

## Thermoplast

3D-Drucker für den Privatgebrauch verwenden größtenteils Thermoplast als Material für die Herstellung von Objekten.



Es können fast alle Thermoplasttypen verwendet werden, aber bei der Materialauswahl muss unbedingt auf die Schmelztemperatur und die Toxizität geachtet werden. Achten Sie darauf, dass Ihr Arbeitsbereich über alle notwendigen Sicherheitseinrichtungen verfügt. Beim 3D-Druck muss immer auf eine gute Entlüftung geachtet werden, insbesondere im Wohnbereich. Kohlefilter, wie man sie für Lötstationen verwendet, stellen eine gute Option dar.



Dieser Abschnitt listet einige der gebräuchlichsten Thermoplasttypen auf. Ihr 3D-Drucker verwendet normalerweise PLA oder ABS, aber denken Sie daran, dass es sehr viel mehr und interessantere Materialien gibt, mit denen Sie experimentieren können. Viele davon wurden für einen speziellen Zweck oder einen bestimmten Teilaspekt entwickelt (wie beispielsweise Temperatur, Stärke, Flexibilität oder Durchsichtigkeit).

Wenn ein Thermoplast für die Verwendung in einem 3D-Drucker aufbereitet wird, wird es in der Regel in einer Fabrik mit spezieller Kunststoffextruder-Ausrüstung und aus 100 % Neumaterial hergestellt. Dabei wird ein streng kontrollierter Kunststoff-»Draht« angefertigt (runder Querschnitt), auch als *Filament* oder *Faden* bezeichnet. Fäden für 3D-Drucker werden normalerweise mit den Standarddurchmessern von 3 mm und (seit neuestem) 1,75 mm angeboten.

Seinen Ursprung hat der Faden für den 3D-Drucker im Kunststoffschweißen für die Automobilindustrie. Jahrelang wurden für den anfänglichen privaten 3D-Druck Standardspulen mit 3 mm starkem Kunststoffschweißdraht verwendet. Heute stellen Unternehmen, die auf die Extrusion von Kunststoff spezialisiert sind, spezifischen Faden (Filament) für die 3D-Druck-Industrie her. Das ist wichtig, weil die geringe Toleranz von 0,1 mm Durchmesser und die Verwendung von Faden mit wirklich rundem Querschnitt für die Produktion hochqualitativer Druckteile unabdingbar sind.

Die meisten Anbieter verwenden Neumaterial für ihre Fäden, aber der 3D-Druck ist ein vielversprechendes Anwendungsgebiet für die Verwendung von recyceltem Kunststoff oder *Regrind*. Viele Menschen sind der Meinung, dass wir eines Tages alte Kunststoffflaschen und Verpackungsmaterial in 3D-Druckern wiederverwenden können. Zahlreiche Projekte wie beispielsweise der Filabot arbeiten an einer Methode, eigenen Faden herzustellen. Derzeit ist die Herstellung von Regrind jedoch langsam und kompliziert. Noch ist es deshalb einfacher, fertigen Faden von der Rolle zu kaufen.

Andere, weniger gebräuchliche Thermoplastmaterialien sind Nylon und *LayBrick*, ein aus Kunststoff und Kreide gemischtes Material, das für Architekturmodelle gut geeignet ist. Eine weitere Option ist *LayWood*, ein mit 40 Prozent Holzfaser gemischtes PLA (um das es gleich noch detaillierter gehen wird). LayWood kann lackiert, gebohrt, geklebt und sandgestrahlt werden, so wie man Holz wie etwa in Form von MDF-Platten bearbeitet. (Abbildung 11.11 zeigt LayBrick, Abbildung 11.12 zeigt LayWood.)

## PLA/PHA-Kunststoff

PLA (Polylactidsäure) ist einer der gebräuchlichsten Grundstoffe für Fäden für den 3D-Drucker. PLA-Kunststoff wird aus Maisstärke hergestellt. Während des Prozesses wird die Milchsäure polymerisiert. Der resultierende Thermoplast wird schon seit vielen Jahren in der Industrie verwendet. PLA wird häufig für die Verpackung von Süßigkeiten, für die Schutzfolie in den Gläsern von löslichem Kaffee und viele andere Dinge verwendet.

PLA kann recycelt werden und zersetzt sich in industriellen Kompostanlagen. Da es sich bei PLA um einen nicht auf Erdöl basierenden Kunststoff handelt, wird es als umweltfreundliche Option betrachtet.



Abbildung 11.11: LayBrick ist relativ weich nach dem Ausdruck, ähnlich wie Kaugummi, härtet aber wie Kreide.



Abbildung 11.12: LayWood kann unter Anwendung unterschiedlicher Temperaturen unterschiedlich gefärbt werden und sogar Maserungseffekte erhalten.

PLA hat eine geringe *Glastemperatur* von 60 Grad Celsius. Dies ist der Punkt, an dem das Material beginnt, vom Feststoff in Flüssigform überzugehen. Der Glaspunkt ist die Temperatur, die von dem beheizten Bett eines 3D-Druckers verwendet wird, um ein Modell in einer stabilen Position zu halten, während gedruckt wird. Das ist wichtig, damit das Objekt später von der Druckplattform gelöst werden kann, und auch, um den Wicklungseffekt so gering wie möglich zu halten, der durch den Auftrag von geschmolzenem Kunststoff verursacht wird (siehe Abbildung 11.13).

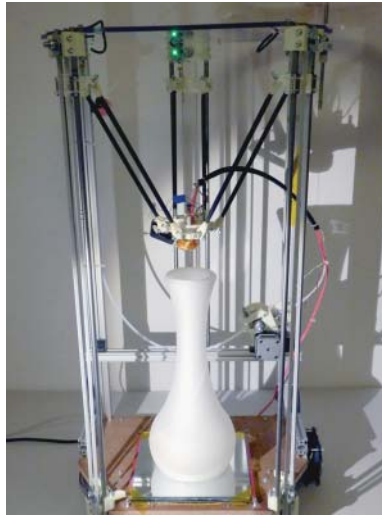


Abbildung 11.13: Große Objekte wie diese Vase können aus PLA-Kunststoff erstellt werden, ohne dass maßgebliche Wicklungseffekte erkennbar sind.

Eine weitere wichtige Temperatur, die man kennen sollte, wenn man sich mit 3D-Druck befasst, ist der *Fließpunkt*. Für PLA liegt er bei ca. 160 Grad Celsius. Für das Drucken mit PLA wird häufig eine Temperatur zwischen 160 und 210 Grad Celsius verwendet. Ist sie höher, wird der Kunststoff zu flüssig für den 3D-Druck. An diesem Punkt beginnt er auch, sich aufzulösen.

Bei Verwendung von PLA werden häufig auch Gebläse eingesetzt, um die Druckschichten während des Ausdrucks zu kühlen. Das hört sich widersprüchlich an, aber für kleine, sehr schnell erstellte Ausdrücke ist es oft die einzige Möglichkeit, eine Schicht ausreichend schnell zu kühlen, um die nächste Schicht darauf aufbringen zu können. Andernfalls erhalten Sie einfach irgendeinen Kunststoffbatzen statt des erträumten Objekts. Gebläse können auch dazu beitragen, dass sich die Druckkanten des Objekts nicht aufrollen. Daraus ergibt sich häufig eine bessere Qualität der Gesamtoberfläche. PLA-Faden gibt es in unterschiedlichen Härte- und Weichheitsgraden.

Beim Schmelzen von PLA entsteht ein süßlicher Geruch – wie Zuckerwatte oder Popcorn –, wodurch es optimal für den Einsatz beim 3D-Drucken zuhause geeignet ist.

PHA (Polyhydroxyalkanoate) oder PHF (Polyhydroxyfettsäuren) sind mit PLA vergleichbar, entstehen aber durch die bakterielle Fermentierung von Zucker (und nicht aus Maisstärke wie

sie für PLA verwendet wird). Es ist keine Bildung von Milchsäure erforderlich, deshalb ist der Herstellungsprozess sehr viel einfacher. PHA befindet sich noch in den Kinderschuhen, was den Einsatz in der Industrie betrifft. Außerdem hat es einen unangenehmen Nebeneffekt: Es kann wie Mist riechen, wenn es zerfällt.

PLA/PHA ist in seiner natürlichen Form halbtransparent. Es kann jedoch mithilfe von Pigmenten in den unterschiedlichsten durchsichtigen und undurchsichtigen Farben hergestellt werden (siehe Abbildung 11.14).



Einige Farbpigmente können sich unterschiedlich auf die Extrusionstemperatur auswirken, ebenso wie darauf, ob das gedruckte Objekt auf der Druckfläche des 3D-Druckers haftet. Wenn Sie Ihren 3D-Drucker zum ersten Mal einsetzen, sollten Sie deshalb am besten ungefärbtes oder weißes Material verwenden.



*Abbildung 11.14: PLA-Faden gibt es in den unterschiedlichsten Farben und mit den unterschiedlichsten Effekten. Beispielsweise gibt es Fäden, die im Dunkeln leuchten, die metallisch schimmern oder fluoreszieren.*

Bei der Verwendung von PLA ist es nicht unbedingt erforderlich, eine beheizte Druckplattform zu verwenden. Wenn Sie Ihre Drucke bei Zimmertemperatur anfertigen wollen, können Sie eine gegossene Akrylplattform oder verschiedene Bänder und Kleber verwenden, um kleinere Teile erfolgreich zu drucken. Für Objekte mit 130 mm oder mehr wird jedoch eine beheizte Plattform empfohlen.





Es ist bekannt, dass einige Hersteller von Billigfäden Fäden produzieren, die auch noch anderen Kunststoff enthalten, als den, den Sie erwarten. Wenn es sich bei diesem Material einfach um ein Additiv oder um eine andere Art Thermoplast handelt, kann es sein, dass der gelieferte Faden schwer zu verarbeiten ist. Kann jedoch das andere Material nicht geschmolzen werden oder es passt nicht durch die Extruderdüse, kann es Ihren gesamten 3D-Drucker verstopfen. Seien Sie besonders vorsichtig bei Verwendung von Fäden aus schwarzem Material, weil auf diese Weise Kontamination oder Ausschuss verborgen werden kann. Kaufen Sie immer von einer vertrauenswürdigen Quelle.

### ABS

ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol) ist ebenfalls eine sehr gebräuchliche Materialoption für 3D-Drucker. Es basiert auf Erdöl und ist deshalb nicht so umweltfreundlich wie PLA, hat aber den Vorteil, dass es eine sehr viel höhere Glasatemperatur besitzt. Für Teile und Objekte, die Temperaturen von bis zu 100 Grad Celsius ausgesetzt werden sollen, ist ABS deshalb die ideale Wahl.

Beim Drucken mit ABS braucht man unbedingt eine beheizte Druckplatte. Die Platte muss mindestens 100 Grad Celsius heiß sein, die Extruderdüse 240 Grad Celsius.

Natürliches ABS ist häufig weiß-grau, aber es kann bei der Herstellung so bearbeitet werden, dass es durchsichtig oder farbig wird. Dazu werden ähnliche Techniken wie für PLA verwendet.



Vermeiden Sie bei der Arbeit mit Materialien wie ABS den Einsatz von Lüftern für die Kühlung. Ein Lüfter oder sogar ein Windzug, die das ABS zu schnell abkühlen, bewirken, dass sich die Kunststoffschichten nach oben biegen und das gedruckte Objekt löst sich von der Druckplatte, noch bevor der Prozess abgeschlossen ist. Ergebnis: Eine große Schweinerei.



ABS ist nicht immer gleich. Es wird aus einer Mischung aus drei Chemikalien hergestellt, die in unterschiedlichen Proportionen verwendet werden, um die Eigenschaften des fertigen Kunststoffs zu beeinflussen. ABS von unterschiedlichen Anbietern kann sich unterschiedlich verhalten. Es kann sein, dass es eine höhere (oder niedrigere) Temperatur für die Extrusion benötigt, dass es weicher oder brüchiger ist. ABS kann sehr viel mehr Abweichungen aufweisen als PLA.

### Paste

Pastenmaterialien können für 3D-Drucker verwendet werden, die einen entsprechend abgeänderten Extruder aufweisen, in der Regel eine Art Spritze oder einen Zylinder. Solche Extruder pressen die Paste ähnlich heraus, wie Sie Zuckerguss aus einer Spritztüle auf den Kuchen pressen. Da es die unterschiedlichsten Pasten gibt, werden häufig lebensmittelechte

Spritzen ausgewählt. Sie sollten diese Spritzen jedoch nicht für unterschiedliche Materialien wiederverwenden oder versuchen, einen normalen Thermoplastextruder zu verwenden.

In einem 3D-Drucker können beliebige auf Lebensmitteln basierende Materialien verarbeitet werden, wenn ein geeigneter Extruder eingesetzt wird. Die Paste muss jedoch die Konsistenz von Zahncreme haben, damit Schichten aufeinander aufgetragen werden können. Zuckerguss, Marzipan, Plätzchenteig oder anderer Teig sind ideal für den 3D-Druck geeignet. Schokolade ist ein sehr viel komplizierteres Material für den 3D-Druck, es ist jedoch auch möglich, Objekte aus Schokolade zuhause zu drucken. Wenn Sie sorgfältig auf die Temperatur und die Kühlmethoden achten, können Sie wunderbare Dekorationen für Torten und Geschenke für Freunde und Ihre Liebsten machen.

Neben allen möglichen Lebensmitteln können so gut wie alle anderen Materialien in Pastenform für den 3D-Druck verwendet werden. Zement, schnell härtendes Harz, Keramik und sogar Edelmetallerde gestatten Ihnen, kunsth Handwerkliche Gegenstände aus festem Material anzufertigen (siehe Abbildung 11.15). Wir werden den Pasten-Extruder in Kapitel 14 genauer betrachten.



*Abbildung 11.15: Feine Porzellanerde kann mithilfe eines Pasten-Extruders gedruckt und später sogar in normalen Brennöfen gebrannt werden, um Keramik herzustellen.*

## Bauteile

Wie die ersten PCs gibt es auch viele 3D-Drucker für den Privatanwender in Form von Bausätzen. Obwohl die Teile relativ einfach zu montieren sind, kann die Konstruktion auf den ersten Blick recht unübersichtlich sein, wenn Sie noch nicht genau wissen, wie alle diese Komponenten zu einer fertigen Maschine zusammenzufügen sind, und wie sie zusammenarbeiten, um einen funktionierenden 3D-Drucker zu schaffen.

### Der Rahmen

Der Rahmen eines RepRap-3D-Druckers besteht im Allgemeinen aus einem gebräuchlichen Material, das es in vielen Ländern auf der ganzen Welt gibt. Auf diese Weise sorgt RepRap dafür, dass der 3D-Druck vielen Menschen offensteht. Oft werden ganz normale Gewindestangen, häufig in den Größen M8 oder M10, als Rahmen verwendet. Einige Drucker-Bausätze verwenden ausgeschnittene Holz- oder Aluplatten als Teil des Rahmens oder direkt als Rahmen. Bei einigen Designs schaffen extrudierte Aluminiumröhren (wie man sie für Industrieregale oder Produktionsausrüstung verwendet) einen starken und leichten Rahmen für den 3D-Drucker.

### Der Extruder

Der *Extruder* oder das *Hot-End* (das »heiße Ende«) eines 3D-Druckers ist eines der wichtigsten Bestandteile, um gute Qualität und einen zuverlässigen Druck sicherzustellen. Nachdem man 7 oder 8 Stunden lang ein Objekt ausgedruckt hat, will man keinesfalls, dass der Extruder den Faden abreißt oder die Düse verstopft. Dadurch wird der Kunststofffluss abgebrochen und Ihr gedrucktes Objekt ist ruiniert. Wenn diese Probleme häufig auftreten, werden Sie Ihren neuen 3D-Drucker ungern einschalten.

Am gebräuchlichsten sind Extruder mit Aluminium- oder Messingdüse mit einem kleinen Loch (in der Regel mit einem Durchmesser von 0,4 oder 0,5 mm) am Ende. Hier tritt der geschmolzene Kunststoff aus und wird schichtweise auf Ihre Druckplatte aufgebracht. Messing wird häufig verwendet, weil es einfacher zu bearbeiten ist, unempfindlich gegenüber Verschleiß ist und eine gute Wärmeleitung besitzt. Außerdem ist Messing weniger nachtragend: Wenn die Düse separat eingeschraubt wird, beschädigen Sie das Gewinde mit Messing nicht so leicht. Aluminium überträgt die Wärme schneller und kann die Druckgeschwindigkeit beschleunigen, aber Aluminium-Extruder sind weniger gebräuchlich.



Obwohl Düsenöffnungen von 0,5 mm gebräuchlich sind, gestatten kleinere Öffnungen (bis ca. 0,2 mm) einen höheren Detailgrad. Die kleineren Düsenöffnungen haben jedoch einen maßgeblichen Nachteil: Sie erhöhen die Druckzeiten ganz dramatisch, nicht selten um bis zu mehr als 10 Stunden, selbst für kleine Objekte. Düsen mit einer Öffnung von 0,6 mm oder 0,8 mm dagegen unterstützen schnellere Druckzeiten und es geht für die meisten 3D-Druckarbeiten nur ein geringes Maß an Details verloren. Sie erhalten auch mit einer größeren Düsenöffnung noch ein brauchbares vertikales Detail, indem Sie niedrigere Schichten drucken.



Modelle, die mit einer einzigen Außenwand gedruckt werden, wie beispielsweise eine Tasse oder ein Topf, profitieren häufig von einer größeren Düse, um das Objekt zu verstärken und eine höhere Wanddicke zu realisieren.

Die Extruderdüse wird in einen Heizblock eingeschraubt. Diese beiden Teile werden häufig kombiniert und als einziges Teil hergestellt. Der Heizblock enthält ein Heizelement, wobei es sich um einen Email-Widerstand, einen Nickelchrom-Draht oder einen *Kartuschenheizer* handeln kann. Ein Kartuschenheizer ist normalerweise die sicherste Form, den Kunststoff zu erwärmen. Außerdem wird ein Temperatursensor benötigt, in der Regel ein Thermistor, um ein geschlossenes Messsystem zu realisieren, das die Elektronik nutzen kann, um das zu extrudierende Material auf ein paar Grad genau aufzuheizen.

Ein weiterer kritischer Aspekt für jedes Hot-End ist eine Möglichkeit, den Heizblock von der Fadenzufuhr zu isolieren. Das ist unabdingbar, und wenn diese Möglichkeit nicht sorgfältig entworfen und präzise ausgeführt wird, führt dies zu vielen Problemen, weil das Material Verstopfungen verursacht. Dieser Abschnitt am Hot-End wird auch als *thermische Trennung* bezeichnet und besteht in der Regel aus einem für hohe Temperaturen geeigneten Kunststoff, häufig PTFE (Teflon) und PEEK (ebenfalls ein Thermoplast für sehr hohe Temperaturen). PTFE wird verwendet, weil es sehr wenig Reibung gegenüber dem eingehenden Faden verursacht, was wirklich wichtig ist: Sobald der Faden beginnt, seine Glasatemperatur zu erreichen, verhält er sich mehr wie Gummi – insbesondere beginnt er, an den Wänden des kalten Endes zu haften. Das kalte Ende hält den Heizblock an seiner Position und dieses Material ist ein Isolator, der die Wärmeleitung verhindert. Das kalte Ende muss unbedingt so kühl wie möglich gehalten werden. Häufig setzt man einen kleinen Lüfter ein, der kalte Luft auf das kalte Ende bläst und für eine gute thermische Isolierung zwischen dem kalten und dem heißen Ende sorgt.

Es gibt viele verschiedene heiße Enden für den RepRap. Sie leisten alle mehr oder weniger dasselbe, aber für bestimmte Maschinen sind einige Designs besser geeignet (siehe Abbildung 11.16).

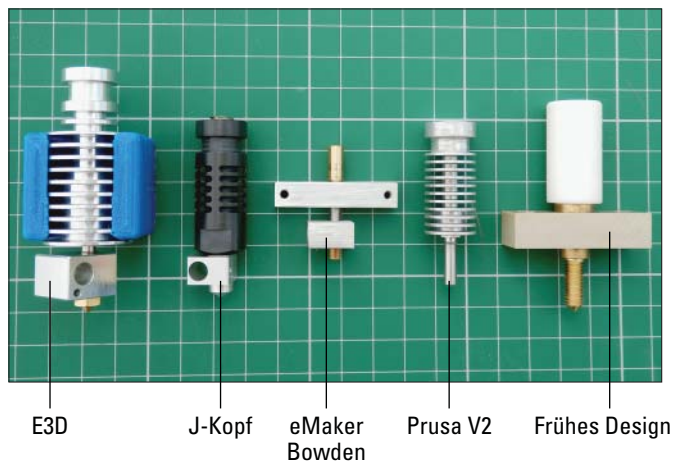
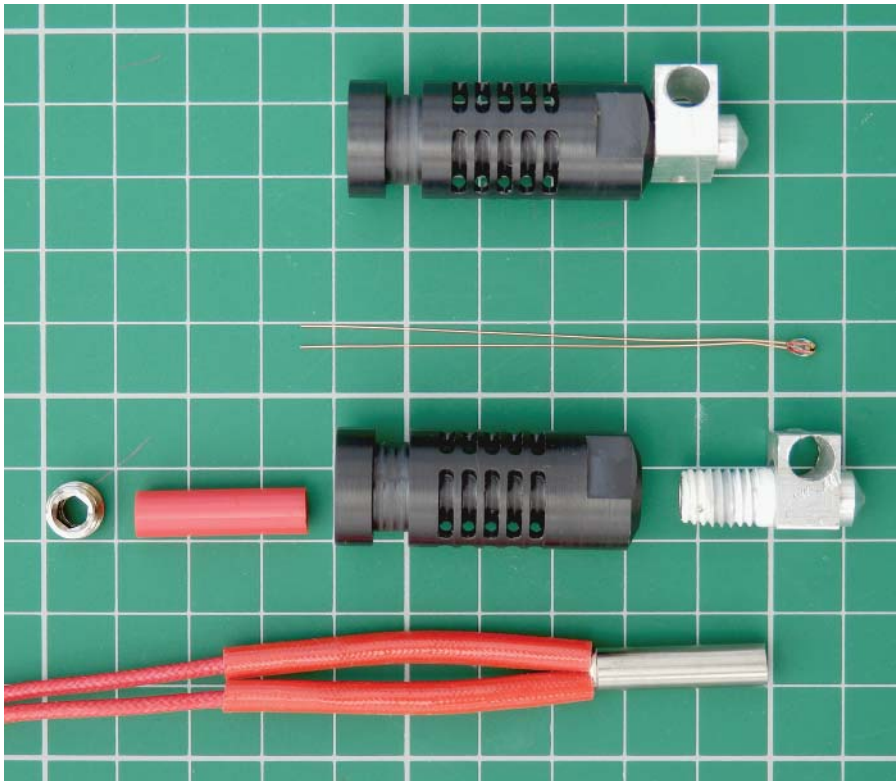


Abbildung 11.16: Viele verschiedene Arten von Hot-Ends für RepRap-Drucker

Die gebräuchlichsten Hot-Ends sind unter anderem:

- ✓ **E3D:** Diese Düse ist auf Materialien mit hoher Temperatur und sehr geringes Aufquellen ausgelegt. Deshalb ist es ausgezeichnet für einen präzisen und feinen Druck geeignet.
- ✓ **J-Kopf:** Ein gutes Allround-Design, jedoch begrenzt auf eine Temperatur unter 250 Grad Celsius aufgrund der verwendeten Materialien. Die J-Kopf-Düse besitzt mehr Teile als die neueren Edelstahl-Designs, aber sie ist einfach zu nutzen und zu warten. Eine montierte und demontierte Ansicht dieser Düse sehen Sie in Abbildung 11.17.



*Abbildung 11.17: Die J-Kopf-Düse ist eine hervorragende Allround-Option*

- ✓ **eMaker Bowden:** Dieses Hot-End wird in dem kleinen Huxley-Drucker eingesetzt.
- ✓ **Prusa V2:** Diese Düse besitzt ein Edelstahlgehäuse mit Kühlrippen aus Aluminium und kann bei Bedarf sehr hohe Temperaturen erreichen.
- ✓ **Frühes Design einer RepRap-Düse:** Diese Düse wird heute kaum noch verwendet, weil die weiße thermische Trennung aus PTFE oft versagte und Verstopfungen verursachte, oder sie bei zu hohen Temperaturen arbeitete.

Edelstahl wird immer beliebter als Isolation für das kalte Ende bei neueren Düsen. Edelstahl hält sehr viel höhere Temperaturen aus als PEEK und PTFE, deshalb kann es Thermoplastmaterial mit höheren Schmelzpunkten als 250 Grad Celsius extrudieren, wie beispielsweise Polykarbonat (für kugelsicheres Glas). Man kann sogar PEEK extrudieren, sodass Sie den Isolator für das kalte Ende für eine neue Düse selbst ausdrucken können.

## Druckplatte

Die Druckplatte Ihres 3D-Druckers kann aus den unterschiedlichsten Materialien hergestellt sein. Viele 3D-Drucker bewegen ihre Druckplatte entlang der Y-Achse nach hinten und vorne, deshalb sollten die Druckplatte und ihre Heizelemente so leicht wie möglich gemacht werden, damit sich die Y-Achse schnell bewegen und beschleunigen kann.

Die Druckplatte ist normalerweise eine flache Holz- oder Aluminiumplatte mit einer Leiterplatte darauf. Die Leiterplatte dient als Heizelement, wenn sie von der Elektronik des 3D-Druckers mit Strom versorgt wird. Außerdem wird eine thermische Isolierung benötigt sowie eine Möglichkeit, die Druckplatte mechanisch zu nivellieren. Mit einer beheizten Druckplatte können Sie mehr Materialien ausdrucken, aber die Beheizung der Druckplatte führt eine weitere Komplikation in den Druckprozess ein und die Elektronik benötigt ein sehr viel leistungsfähigeres Netzteil.

Viele 3D-Drucker nutzen die Tatsache, dass Sie PLA ohne beheizte Druckplatte drucken können. Diese niedrigere Temperatur senkt die Gesamtkosten und den Strombedarf eines 3D-Druckers, aber Sie sind auch auf eine kleinere Materialpalette beschränkt. Sie können später fast immer ein beheiztes Druckbett nachrüsten, wenn Sie es für ein Projekt benötigen.

Statt Objekte direkt auf der heizenden Leiterplatte auszudrucken, ist es sinnvoll, eine glatte Oberfläche für den Druck bereitzustellen, wie beispielsweise eine Glasplatte. Wenn Sie mit PLA drucken, klebt das Material direkt auf dem sauberen Glas, wenn es auf 60 Grad aufgeheizt wird. Nachdem der Druck abgeschlossen ist, lösen sich die Teile von selbst, sobald sie abgekühlt sind.

Wenn Sie keine beheizte Fläche für PLA verwenden, ist das optimale Material 3M Blue Painter Tape für Multi-Surfaces (Teilenummer 2090). Wenn Sie die Druckfläche mit diesem Band abdecken, können Sie zahlreiche Drucke anfertigen, bevor Sie das Band wechseln müssen.



Für PLA kann auch eine Druckplatte aus einfachem Plexiglas verwendet werden, aber stellen Sie den Abstand der Düse am heißen Ende sehr sorgfältig ein. Wenn die Düse zu nahe kommt, können Sie das gedruckte Objekt nach dem Druck kaum noch von der Druckplatte lösen.

Bei ABS gibt es genau das entgegengesetzte Problem: Es kann schwierig sein, es an der Druckplatte haften zu lassen. Um erfolgreich mit ABS zu drucken, muss die Fläche auf 100 Grad Celsius aufgeheizt werden. Darüber hinaus müssen Sie eine Schicht (in der Regel Kapton-Band) auf die beheizte Glasplatte aufbringen, um zu regeln, wie das ABS-Objekt an der

Druckplatte haftet. (Für diesen Zweck kann auch PET-Band genutzt werden.) Wenn Sie immer noch Probleme haben, das ABS-Teil haften zu lassen, können Sie eine verdünnte Lösung aus ABS und Aceton auf die zusätzliche Schicht pinseln (unabhängig davon, ob es sich dabei um Glas, Kapton oder PET handelt), um die Haftung zu verstärken.

Die Suche nach guten Materialien für die Druckplatte ist eine stetige Aufgabe für den 3D-Drucker im Privatbereich. Nicht jede Oberfläche ist für alle Thermoplastfäden geeignet. Viele Benutzer befestigen deshalb die Glasplatte mit starken Büroklammern auf der Leiterplattenheizung, sodass beide Platten schnell entfernt und gegebenenfalls durch andere Materialien ausgetauscht werden können (siehe Abbildung 11.18).



Wenn Sie mit Nylon drucken, brauchen Sie eine auf Zellulose basierende Druckfläche. Häufig werden erfolgreich Tufnol, Holz oder Karton verwendet.

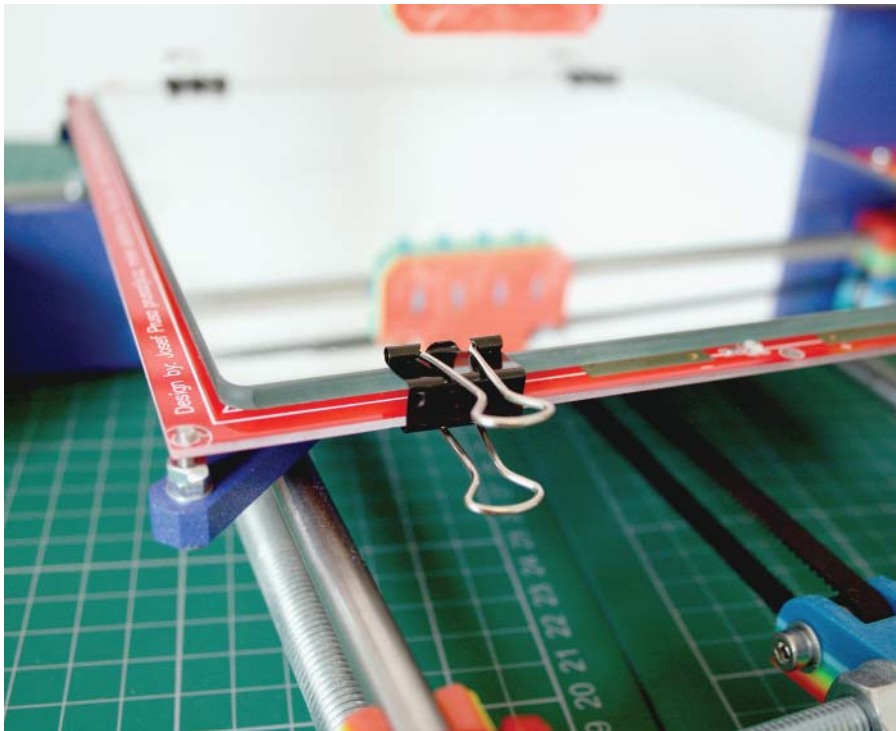


Abbildung 11.18: Starke Büroklammern gestatten, die Spiegelglasscheibe schnell zu entfernen oder an der Heizplatine zu befestigen.

## Steuerelektronik

Die Elektronik Ihres 3D-Druckers basiert häufig auf der Open Source-Plattform Arduino. In Kapitel 13 werden wir verschiedene RepRap-Elektroniksysteme betrachten, unter anderem auch ihre modularen Teile und Verbindungen.



Das Programm, das auf der Elektronik für einen 3D-Drucker ausgeführt wird, ist die sogenannte *Firmware*. Es kommt häufig vor, dass Sie wichtige Einstellungen in dieser Firmware ändern und sie neu in die Elektronik laden müssen.

## Software

Ein weiterer kritischer Teil des 3D-Drucks ist die Software, mit der 3D-Modelle entworfen, ausgegeben (oder konvertiert), repariert und verarbeitet werden, um Code zu erzeugen, den der 3D-Drucker versteht.

In Kapitel 15 sehen wir uns die Software für die Erstellung von 3D-Objekten genauer an und betrachten außerdem die Software für die Ver- und Bearbeitung von 3D-Modellen für Ihren RepRap-Drucker. In den folgenden Abschnitten geht es um ein paar grundlegende Anwendungen für den 3D-Druck.

## Slic3r

Slic3r, entwickelt von Alessandro Ranellucci, ist ein Open Source-Tool für die Umwandlung von 3D-Modellen für den Druck. Die Software Slic3r kann für den PC, Mac und Linux unter [www.slic3r.org](http://www.slic3r.org) heruntergeladen werden. Slic3r wird laufend erweitert und ist damit die ideale Wahl für die schnelle Entwicklung im Bereich des 3D-Drucks. Die Community schlägt ständig Verbesserungen vor und führt diese aus. Informieren Sie sich regelmäßig, was neu ist oder verbessert wurde.

Die wichtigste Aufgabe eines 3D-Printslicing-Programms ist es, ein Modell in lauter dünne Schichten zu zerlegen, die geometrisch und maßtechnisch korrekt sind, und die Pfade für das extrudierte Material auf jeder Schicht zu planen. Wenn das Printslicing-Programm seine Aufgabe ordnungsgemäß erledigt hat, verarbeitet die Firmware des 3D-Druckers diese Daten und steuert die Bewegung der Druckerkomponenten, um schließlich das fertige Modell auszudrucken.

Das Slicing-Programm analysiert das Modell auch auf seine Druckfähigkeit. Es kann entscheiden, ob zusätzliche Befehle benötigt werden – ob zusätzliches Material ausgedruckt werden muss, um beispielsweise eine Brücke zu stützen. Wenn Sie außerdem festlegen, dass ein Stützmaterial verwendet werden soll, versucht der Slicer, das benötigte Material, das später wieder entfernt werden muss, so gut wie möglich anzubringen, ohne dass Sie das Modell später ändern müssen. Ein Slicing-Programm muss also eine gewisse Intelligenz anwenden,

wenn es ein Modell auf diese Weise zerlegt. Wenn Materialüberhänge und Brückenabschnitte benötigt werden, muss möglicherweise der Umriss des Objekts geändert werden. Oder es muss erkannt werden, wenn Lücken überbrückt werden müssen, um den Ausdruck stabil und optisch einwandfrei zu realisieren.



RepRap-3D-Drucker verwenden die Steuersprache *G-Code*, ebenso wie die gewerblich genutzten 3D-Drucker, die bei 35.000 Euro beginnen. G-Code ist ein Industriestandard mit Befehlen und Codes für die Beschreibung eines Pfads, nach dem ein 3D-Drucker (oder sogar eine CNC-Fräsmaschine) vorgeht, um ein 3D-Objekt auszudrucken. Alle für RepRap-Drucker verwendeten Software-Tools können somit auch für Profimaschinen verwendet werden. Der Unterschied zum RepRap ist, dass die Weiterentwicklung von G-Code höchst dynamisch ist. Dem G-Code-Umfang können ganz einfach neue Codes und Befehle hinzugefügt werden, wenn sich die Technologie weiterentwickelt. Es gibt viele verschiedene Slicing-Programme für den 3D-Druck, aber Slic3r ist der Favorit bei allen RepRap-Benutzern auf der ganzen Welt. Andere Slicing-Programme, die Sie auch ausprobieren können, sind Cura, Repetier-Host und Kisslicer.

### netfabb

netfabb ist ein sehr leistungsfähiges kommerzielles Software-Paket, das ideal für viele Bereiche der Bearbeitung von 3D-Dateien geeignet ist. Es handelt sich dabei nicht um ein Open Source-Programm, aber eine Basisversion, die immer noch immens viele Funktionen besitzt, kann kostenlos unter [www.netfabb.com](http://www.netfabb.com) heruntergeladen werden.

RepRap-Benutzer schätzen netfabb Basic, um Modelldateien zu überprüfen, bevor sie sie einem Slicing-Programm übergeben. Mit netfabb können Sie Ihre Objektmodelle drehen, skalieren und abändern (oder reparieren). Wenn Sie ein Modell in netfabb laden, bevor Sie es in Slic3r laden, können Sie überprüfen, ob das Modell 3D-druckbar ist, ob es die richtige Orientierung aufweist und ob es in der Größe gedruckt wird, die Sie brauchen.

netfabb Basic ist für Windows, Mac und Linux erhältlich. Außerdem gibt es eine cloudbasierte Version, die häufig noch besser geeignet ist, um Probleme mit 3D-Modell-Meshes zu lösen, die Fehler enthalten oder für die kein korrektes Slicing durchgeführt werden kann.

Außerdem werden Profiversionen mit speziellen netfabb-Paketen zum Kauf angeboten, die auf spezifische Drucker zugeschnitten sind (unter anderem den Ultimaker).

### Pronterface

Pronterface ist eine Open Source-Benutzeroberfläche für RepRap-Drucker, mit der Sie Ihren 3D-Drucker steuern und G-Code-Dateien zum Ausdruck senden können. Das vollständige Printron-Softwarepaket wurde von Kliment Yanev entwickelt und wird in der 3D-Druck-Community für private RepRap-Drucker allgemein eingesetzt.

Das Printron-Paket wird für Windows, Mac und Linux angeboten und kann unter <http://koti.kapsi.fi/~kliment/printrun> heruntergeladen werden.



Pronterface ist ein wichtiges Programm für die einfache Nutzung Ihres 3D-Druckers. In Kapitel 15 verwenden wir Pronterface, um Ihren 3D-Drucker zu steuern, einzurichten und zu kalibrieren, deshalb sollten Sie es sich vorab schon einmal herunterladen.



Pronterface kann mit Slic3r verknüpft werden. Auf diese Weise können Sie Modelldateien laden und im Hintergrund unter Verwendung der bereits definierten Profile mit Slic3r ein Slicing in G-Code durchführen.

### *Repetier-Host*

Repetier-Host ist eine alternative Slicing-Engine und Steuerzentrale für Ihren 3D-Drucker. Es ist von der Funktion her mit Pronterface und Slic3r vergleichbar und kann mit Slic3r kombiniert werden.

Repetier-Host wird für Windows, Mac und Linux angeboten und kann unter [www.repetier.com/download](http://www.repetier.com/download) heruntergeladen werden.

### *ReplicatorG*

ReplicatorG ist ein weiteres etabliertes Open Source-Paket für das Modell-Slicing und die Steuerung des 3D-Druckers. Es wird von einigen Closed Source-Herstellern von 3D-Druckern verwendet, hat aber bereits allgemeine Beliebtheit bei RepRap-Benutzern und -Entwicklern errungen.

ReplicatorG wird für Windows, Mac und Linux angeboten und kann unter [www.replicat.org](http://www.replicat.org) heruntergeladen werden.



## Teil V

# Einen RepRap-3D-Drucker bauen



## *In diesem Teil ...*

- ✓ Wählen Sie Ihren eigenen RepRap-3D-Drucker aus, entwerfen ihn und montieren ihn. Dazu verwenden Sie Bausätze oder beschaffen sich die Komponenten und Elektronik selbst – unter Verwendung der fantastischen Open Source RepRap-Hardwaredesigns.
- ✓ Montieren und kalibrieren Sie Ihren eigenen 3D-Drucker unter Verwendung allgemein erhältlicher Hardwarekomponenten und ein bisschen Knochenschmalz.
- ✓ Finden Sie heraus, wie Sie mehrfarbig drucken können.
- ✓ Erfahren Sie, wie Sie Ihren Extruder warten und Upgrades für Ihren RepRap-Drucker durchführen.

# Montage der Bauelemente

# 12

## In diesem Kapitel

- ▶ Materialien für den Bau Ihres Druckers finden
- ▶ Bewegungselemente identifizieren
- ▶ Die Rahmenstruktur bauen
- ▶ Die bewegliche Achse und die Messfunktionen montieren

---

In diesem Kapitel geht es darum, wo Sie geeignete Materialien finden oder einen 3D-Drucker-Bausatz kaufen können. Wir betrachten den Bau von Rahmen für Delta- und kartesische 3D-Drucker. Wir zeigen Ihnen, wie die Bewegung der Maschine erfolgt und wie Messfunktionen eingerichtet werden, und bereiten die Verdrahtung und den Einbau der Elektronik vor, die in Kapitel 13 beschrieben ist.

In diesem Kapitel werden viele Grundlagen beschrieben, es darf jedoch *nicht* als Bauanleitung für einen spezifischen Drucker verstanden werden. Stattdessen soll es Ihnen helfen, die für Sie am besten geeignete Maschine auszuwählen.

## Materialien finden

Für einen neuen RepRap-Anwender wie Sie ist die schwierigste Aufgabe zunächst, alle Dinge zu beschaffen, die für den Bau des 3D-Druckers benötigt werden, und dann herauszufinden, ob das, was dann vor Ihnen liegt, für Ihre Zwecke geeignet ist.

Wie bereits erwähnt, ist der Bau eines eigenen 3D-Druckers die Mühe wirklich wert. Der Kauf eines Bausatzes scheint verlockend zu sein, aber letztlich müssen Sie verstehen, wie die Maschine funktioniert, um sie langfristig nutzen zu können.

## Bausätze

Ein Bausatz aus Fertigteilen kann eine gute Methode darstellen, in den RepRap-Druck einzusteigen. Sie erhalten alle Teile, die Sie brauchen, fertig zugeschnitten und montagebereit. Ein schlechter Bausatz enthält unsortierte Teile, die weder beschriftet noch nummeriert sind, und bietet keine Anleitung, wie beim Bau vorzugehen ist. Ein guter RepRap-Bausatz enthält beschriftete Tüten mit Einzelteilen oder Montagematerial. Und ein hervorragender Bausatz enthält sogar die Werkzeuge, die Sie brauchen, um die Maschine zu montieren – normalerweise Maulschlüssel und Inbusschlüssel (siehe Abbildung 12.1). Außerdem kann ein solcher Bausatz

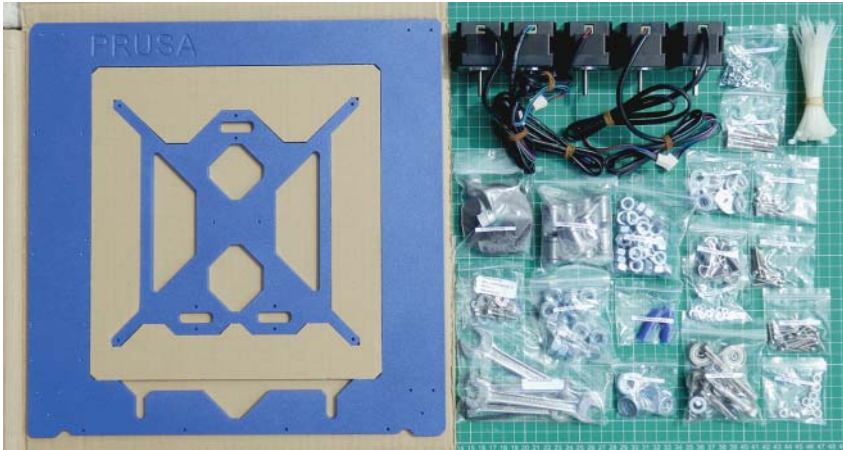


Abbildung 12.1: Ein beeindruckender 3D-Drucker-Bausatz

einen Link auf Online-Bauanleitungen enthalten oder auf einen Abschnitt in einem RepRap-Forum oder -Wiki, wo Sie mehr über Ihren Bausatz und seine Montage erfahren.

Nehmen Sie sich unbedingt die Zeit, die Sie brauchen, um sich nach einem geeigneten RepRap-Bausatz umzusehen. Es gibt Bausätze von den unterschiedlichsten Anbietern und von Startup-Unternehmen im Bereich 3D-Druck und in den unterschiedlichsten Qualitäten und mit dem unterschiedlichsten technischen Support. Stellen Sie Fragen zu dem Bausatz, den Sie kaufen wollen. Beobachten Sie, wie lange der Händler braucht, um diese zu beantworten, und ob er Ihnen hilfreiche Informationen bereitstellen und Sie mit seinem Wissen über das Thema überzeugen kann. Wenn Ihnen die Antwort nicht gefällt, kaufen Sie nicht bei ihm.

Ein guter Anbieter von Bausätzen erklärt, welche Materialien in dem Bausatz verwendet wurden, und kennt in der Regel alle Open Source-Informationen, die Sie zu dem Design brauchen. Einige Anbieter können Ihnen eine vollständige Liste aller im Bausatz verarbeiteten Materialien bereitstellen, sodass Sie selbst einen solchen Bausatz zusammenstellen können – oder viele davon.

Ein schlechter Anbieter von Bausätzen dagegen versucht, diese Information vor Ihnen zu verbergen. Er erklärt Ihnen wahrscheinlich, dass es sich um einen Bausatz für einen bestimmten Typ RepRap-Drucker handelt, oder er will Sie davon überzeugen, dass es sich um eine spezifische Version handelt, oder er lässt Details zu dem Inhalt des Kits weg. Wenn der Händler keine detaillierten Informationen bereitstellen kann, sollten Sie nichts von ihm kaufen.



Bausätze können die unterschiedlichsten Qualitäten aufweisen. Bevor Sie kaufen, sollten Sie sich bei den verschiedenen Anbietern informieren und Fragen stellen, falls Sie noch weitere Informationen brauchen. Solche Fragen könnten etwa die folgenden Inhalte haben:



- ✓ **Welche Materialien wurden für die 3D-gedruckten Teile verwendet? und Wie hoch ist die Füllichte der gedruckten Teile?** Es ist wichtig, das Material zu kennen. Einige Lieferanten verwenden spezifische Teile aus ABS, wenn diese eine höhere Temperatur aushalten müssen als PLA-Teile. Es ist jedoch meist auch nicht verkehrt, PLA für den Bau der Maschine zu verwenden. Wenn das von Ihnen gewählte 3D-Drucker-Design 3D-gedruckte Zahnräder verwendet, um den Extruder oder die Bewegung der Maschine anzutreiben, sollten diese unbedingt aus PLA bestehen – weil sie eine sehr viel längere Lebensdauer aufweisen als Zahnräder aus ABS.  
Suchen Sie nach Anbietern, die die richtigen Materialien für den von Ihnen ausgewählten Drucker bereitstellen. Sie sollten mindestens 25 Prozent Innenfüllung aufweisen, Extruderteile mindestens 35 Prozent. Bitten Sie gegebenenfalls um ein Foto.
- ✓ **Welche Elektronik wird geliefert? Handelt es sich um einen RepRap-Standard oder um eine eigene Entwicklung des Anbieters?** Möglicherweise ist die Elektronik auch überhaupt nicht im Bausatz enthalten. Häufig muss die Elektronik separat gekauft werden.
- ✓ **Basiert der Bausatz auf einem neueren Release des RepRap-Druckers, den Sie für sich ausgewählt haben?**
- ✓ **Wenn der Bausatz per Laser ausgeschnittene Teile enthält, welche Materialien werden dafür verwendet, und wie dick sind sie?** Vergleichen Sie mit anderen Quellen und Lieferanten. Wurden die Ecken mit einer reduzierten Dicke angefertigt oder aus einem dünneren Material ausgeschnitten?
- ✓ **Bestehen die geraden Schienen des Bausatzes aus Edelstahl oder nur aus einfachem Karbonstahl?** Ein höherer Preis für Edelstahl ist gerechtfertigt. Edelstahlteile sind verschleißfester und erzeugen nicht so viele Schmierölrückstände auf Gestängen und Lagern.
- ✓ **Welche Motoren sind in dem Bausatz enthalten?** Achten Sie darauf, dass es sich wirklich um bipolare 4-polige Motoren handelt. Fragen Sie nach der Stromauslegung. Achten Sie außerdem darauf, ob die Steckverbinder bereits an den Kabeln befestigt sind, weil das viel Zeit spart. In der Regel werden NEMA 17-Motoren für RepRap-Bausätze verwendet; sie haben abhängig von der Gesamtlänge des Motorgehäuses eine bestimmte Stromauslegung. Sie brauchen mindestens 1,2 Ampere (A). Ein leistungsfähigerer Motor bietet 1,7 A. Der maximale Nennwert für einen NEMA 17-Motor beträgt ca. 2,5 A.
- ✓ **Sind Kunststoffteile enthalten?** Einige Anbieter von Bausätzen stellen die 3D-gedruckten Kunststoffteile nicht mit bereit. Überprüfen Sie, ob diese separat erhältlich sind.



Wenn Sie einen kleineren 3D-Drucker kaufen, wie beispielsweise den Huxley, ist es normal, dass kleinere NEMA 14-Motoren im Lieferumfang enthalten sind. Diese funktionieren ausreichend gut für die leichten Maschinen. Für größere Maschinen brauchen Sie häufig größere Motoren, um die schwereren Achsen schnell bewegen zu können – für private 3D-Drucker in der Regel NEMA 17-Motoren. Sehr viel größere NEMA 23- und 34-Motoren werden häufig für CNC-Fräsmaschinen und andere Geräte für die subtraktive Fertigung eingesetzt. Thermoplast-Extruder werden fast immer schnell und optimal über NEMA 17-Motoren betrieben.

## **Eigenbeschaffung**

Wenn Sie mehrere 3D-Drucker selbst bauen wollen, kann es sinnvoll sein, sich die Teile selbst zu beschaffen – was im Einzelnen bedeutet, dass Sie herausfinden müssen, was Sie eigentlich brauchen. Dies lohnt sich auch für Gruppen einzelner Benutzer, die gemeinsam denselben Drucker bauen wollen.

Wenn Sie versuchen, Teile für einen einzigen Drucker zu kaufen, kostet dies häufig genauso viel (wenn nicht sogar mehr) wie ein Bausatz. Genau deshalb stellt Ihnen ein guter Bausatzhändler alle Informationen bereit, die Sie brauchen, um alle Teile für den von Ihnen gebauten RepRap-Drucker kaufen oder identifizieren zu können. Diese Information gibt es mit Sicherheit schon irgendwo im Internet. Der Aufwand, die Zeit und das Risiko, alle Einzelteile selbst zu beschaffen, können maßgebliche Kosteneinsparungen bedeuten, wenn Sie mit einer Gruppe von Gleichgesinnten mehrere Drucker bauen. Wenn Sie nur einen Drucker bauen und beschließen, alle Teile selbst zu besorgen, müssen Sie häufig mehr kaufen, als Sie eigentlich brauchen, oder Sie müssen sehr viel mehr für die benötigte Anzahl zahlen. Außerdem fallen womöglich jede Menge Porto- und Zollgebühren an, wenn Sie die Teile aus der ganzen Welt bestellen. Beachten Sie außerdem, dass häufig Komponenten schlechter Qualität geliefert werden, oder ein Ersatz für die von Ihnen benötigten Teile, den Sie nicht wollen oder der nicht zu Ihrer Maschine passt. Aus diesem Grund kaufen sich Einzelpersonen häufig besser einen Bausatz von einem Anbieter, als zu versuchen, alle Komponenten selbst zu beschaffen.



Wenn dies Ihr erster 3D-Drucker ist, dann halten Sie sich nicht damit auf, alle möglichen verschiedenen Teile von unterschiedlichen Anbietern zu bestellen. Ein Bausatz ist immer der beste Ausgangspunkt.

## **Selbst drucken**

Wenn Sie einen funktionierenden 3D-Drucker haben, dann haben Sie es natürlich unter so gut wie uneingeschränkter Kontrolle, einen weiteren Drucker für sich selbst oder Freunde zu drucken. Selbst Upgrades oder Ersatzteile für Ihren eigenen 3D-Drucker sind ganz einfach auszudrucken.

RepRap-Drucker werden immer eigenständiger und können immer einfacher ausgedruckt werden. Dieser einzigartige Charakter der RepRap-Technologie ist einer der wichtigsten

Vorteile, die der Besitz eines 3D-Druckers mit sich bringt. Sie können ihn selbst ändern, aktualisieren und reparieren, ohne übertriebene Ersatzteile kaufen zu müssen.

Immer häufiger findet man 3D-Drucker in unmittelbarer Nähe. Viele davon werden bereitgestellt, um zu einem angemessenen Preis Dinge darauf auszudrucken. Und eine der häufigsten Rechtfertigungen für den Kauf eines RepRap-3D-Druckers ist es, dass man Dinge ausdrucken kann, die man anschließend verkaufen kann.

Sie können auch professionelle 3D-Druck-Services und Online-Druckanbieter nutzen, um sich Teile für einen RepRap-Drucker ausdrucken zu lassen, aber das kostet sehr viel mehr, als wenn Sie das auf einem anderen RepRap-Drucker machen.

## *eBay*

eBay oder andere Onlinemärkte sind immer eine gute Quelle. Die Verkäufer bei eBay stellen Ihnen zahlreiche Informationen über die gedruckten Teile bereit, über verfügbare Maschinen-Designs und darüber, welche Preise für solche Artikel aktuell sind. Es muss jedoch gesagt werden, dass die auf eBay angebotenen 3D-gedruckten Teile nicht immer dieselbe Qualität aufweisen. Einige sind schlicht und einfach unbrauchbar, andere können gerade eben so genutzt werden, um das Ganze zum Laufen zu bringen, müssen aber bald danach schon wieder ersetzt werden. Glücklicherweise gibt es auch sehr viele gute Lieferanten auf eBay. Machen Sie also Ihre Hausaufgaben: Fragen Sie in der RepRap-Community nach. Irgendjemand kann Ihnen immer eine gute Quelle für gedruckte Teile und Maschinenbausätze empfehlen.

## *Druckteile für die Montage der Maschine*

Später in diesem Kapitel beginnen wir mit der Beschreibung der Montage eines Prusa i3 3D-Druckers. Wir beginnen hier mit der Rahmenmontage. In späteren Teilen montieren wir alle anderen Teile für den Drucker.

Bausätze für den Aluminiumrahmen und die anderen mechanischen Teile gibt es aus den unterschiedlichsten Quellen. Sie können natürlich die Einzelteile auch selbst beschaffen oder drucken. Oder einen Freund mit 3D-Drucker bitten, dies für Sie zu tun. Die Masterdateien finden Sie unter <https://github.com/josefprusa/Prusa3-vanilla> im GitHub-Archiv von Josef Prusa. Die Teile, die Sie für den Bau benötigen, sind in den Tabellen 12.1 und 12.2 aufgelistet.

## *Die Bewegung der Maschine verstehen*

Nachdem Sie die Teile für Ihren RepRap-3D-Drucker beschafft haben (oder auch vorher), sollten Sie überlegen, wie das fertige Gerät funktionieren soll, bevor Sie mit der Montage beginnen. Für die Bewegung der Maschine können Sie Material aus den unterschiedlichsten Materialien, in den unterschiedlichsten Größen und mit den unterschiedlichsten technischen Daten verwenden. Hier betrachten wir einige der gebräuchlichsten und eher experimentellen Methoden, die lineare Bewegung zu realisieren, durch die der 3D-Druck stattfinden kann.

Teil	Details	Menge
Y-Eckteile	Werden an den M8- und M10-Gewindestangen angebracht, um die Konstruktionsbasis der Y-Achse zu bilden	4 – eines an jeder Ecke
Y-Motormontage	Wird zur Montage des Y-Motors auf der Gewindestange angebracht	1
Y-Leerlaufmontage	Wird für die Montage der Umlenkrollen für den Y-Riemenantrieb auf den Gewindestangen angebracht	1
Y-Riemenklemme	Wird verwendet, um den Y-Antriebsriemen fest an die bewegliche Y-Achse zu klemmen	1

*Tabelle 12.1: Druckteile für die Montage des unteren Rahmens der Y-Achse*

### Bewegung entlang der Z-Achse

Die vertikale Achse, bei einer kartesischen Maschine auch als Z-Achse bezeichnet, wird normalerweise langsam und mit einer hohen Auflösung angetrieben, um feine Details und präzise gedruckte Schichten zu erhalten.

Die meisten Maschinen müssen den gesamten beweglichen X-Wagen anheben, einschließlich des Extruders mit Motor und Hot-End, um eine Bewegung der vertikalen Z-Achse zu erzeugen. Häufig verwenden sie dazu zwei Schrittmotoren, einen an jeder Seite der Maschine. Beide Motoren werden von nur einem Schrittmotorausgang gesteuert. Sie müssen synchron miteinander arbeiten.

Bei den meisten RepRap-Maschinen erzielt ein vertikaler Z-Wagen diesen Hebevorgang mithilfe einer einfachen Gewindestange, die an die Motorwelle angeschlossen ist: In den 3D-gedruckten Z-Wagen wird eine normale Mutter eingeklemmt. Wenn sich der Motor dreht, wird die Mutter entlang der Gewindestange nach unten oder oben geschraubt. Wenn Sie das auf beiden Seiten der Maschine machen, erhalten Sie ein paralleles Anheben. Diese Konfiguration sorgt automatisch für eine feine Auflösung für Ihre Druckschichten, weil eine vollständige Umdrehung selbst bei groben M8-Stangen den Wagen nur um 1,25 mm pro Drehung nach oben oder unten bewegt. Dies ist eine einfache, kostengünstige Methode, eine feinauflösende Bewegung zu erzielen; der größte Nachteil dabei ist, dass eine Standardmutter und eine Standardgewindestange nicht für die ganze Bewegung optimiert sind, die beim 3D-Druck erforderlich ist. Sie müssen die Geschwindigkeit Ihrer Motoren sorgfältig beschränken, weil die Konstruktion sonst blockiert oder springt.

Glücklicherweise ist eine langsame vertikale Z-Achse keine einschneidende Beschränkung für die meisten 3D-Drucker. Der Druckkopf wird sehr lange innerhalb der X- und Y-Achsen bewegt, um die einzelnen Schichten zu drucken, und weniger entlang der Vertikalen. Aber offensichtlich ist diese Art Bewegung über Gewindestangen nicht für die X- und Y-Achsen eines 3D-Druckers geeignet, weil die Bewegung unangemessen langsam wäre.

Teil	Beschreibung	Typ	Menge
Gewindestange	M8-Stangen, 210 mm lang	Stange – Stahl oder Edelstahl	4
Gewindestange	M10-Stangen, 380 mm lang	Stange – Stahl oder Edelstahl	2
Gleitstange	M8-Gleitstangen, 350 mm lang, für die Bewegung der Y-Achse	Gleitstange – Stahl oder Edelstahl	2
Linearlager	LM8UU-Linearlager für die Bewegung der Y-Achse	Bewegung	3
M8-Mutter	M8-Mutter, einfache oder Sicherungsmutter	Befestigung	22
M10-Mutter	M10-Mutter, einfache oder Sicherungsmutter	Befestigung	12
M8-Unterlegscheibe	Gerade M8-Unterlegscheibe	Befestigung	22
M10-Unterlegscheibe	Gerade M8-Unterlegscheibe	Befestigung	22
Kugellager	624ZZ-Kugellager für die Bandrolle	Bewegung	2
M4-Schraube	25 mm M4-Schraube für die Rolle	Befestigung	1
M4-Mutter	M4-Mutter, einfache oder Sicherungsmutter	Befestigung	1
M4-Unterlegscheibe	Gerade M8-Unterlegscheibe	Befestigung	2
Kabelbinder	100 mm lang, 3,2 mm stark, Kabelbinder zur Sicherung der Linearlager und der Gleitstangen	Befestigung	7
M3-Schraube	20 mm M3-Schraube für die Fixierung des Heizbetts an der Y-Achse	Befestigung – am besten aus Edelstahl	4
M3-Mutter	Einfache M3-Mutter für die Fixierung des Heizbetts an der Y-Achse	Befestigung – am besten aus Edelstahl	4
M3-Unterlegscheibe	Gerade M3-Unterlegscheibe für die Fixierung des Heizbetts an der Y-Achse	Befestigung – am besten aus Edelstahl	4

Teil	Beschreibung	Typ	Menge
Per Laser ausgeschnittene Platte für die Y-Achse	Es gibt verschiedene Designs; wählen Sie die Version aus, die für Ihre Linearlager geeignet ist.	6 mm Aluminium	1
M3-Schraube	16 mm M3-Schraube für die Sicherung des Motors an der Y-Achse, zwei weitere für die Sicherung der Y-Riemenklemme	Befestigung – am besten aus Edelstahl	4
GT2-Zahnriemen	Einer der GT2-Zahnriemen	Bewegung	1
NEMA 17-Motor	NEMA 17-Motor, Auslegung von 1,2 A bis 2,5 A	Bewegung	1
GT2-Antriebsritzel	Wird auf dem NEMA 17-Motor angebracht	Bewegung	1

Tabelle 12.2: Mechanische Teile für die Montage der unteren Y-Achse



Wie Sie in den nachfolgenden Kapiteln lesen werden, kann es ganz praktisch sein, eine *Z-Liftfunktion* einzuführen, die den Extruderwagen weiterspringen lässt, wenn die Maschine sich zu einem neuen Druckpunkt bewegen muss. Der Z-Lift kann verhindern, dass die Druckdüse versehentlich ein Stück bereits gedruckten Kunststoff mitnimmt (wodurch das Modell womöglich seine Ausrichtung verliert). Sie können den Z-Lift für Ihren Extruder so schnell machen, wie Ihre Z-Achse das erlaubt.

Viele RepRap-Originalmaschinen verwendeten früher M8 (8 mm) oder äquivalente Gewindestangen britischen Maßes für die Z-Achse. Heute sind M6- oder M5-Stangen gebräuchlicher, die feinere Schichten unterstützen und immer noch schnell genug betrieben werden können, um hochqualitative Ergebnisse zu erzielen. Der in Abbildung 12.2 gezeigte Drucker verwendet eine M5-Gewindestange und eine eingeformte M5-Mutter. Die Verbindung zum Motor erfolgt über eine kurze Vinylröhre, die die Drehbewegung der Gewindestange ermöglicht. Eine feste Verbindung mit dem Motor kann bewirken, dass sich die Gewindestange an den vertikalen Gleitstangen reibt, wodurch die Druckschichten beeinträchtigt werden können.

Andere erhältliche Produkte sind speziell auf diese lineare Bewegung ausgerichtet. Sie können sehr viel schneller als die auf Gewindestangen basierenden Standardsysteme betrieben werden. Allerdings kosten sie auch mehr, sind schwieriger zu beschaffen und nicht ganz einfach im Einbau.

Abbildung 12.3 zeigt drei verschiedene Bewegungssysteme, die für die vertikale Z-Achse genutzt werden können. Links sehen Sie eine M8-Gewindestange mit M8-Gewindemutter,





Abbildung 12.2: Der Antrieb der vertikalen Z-Achse eines Prusa i3-Druckers mit M5-Gewindestange und eingeworfener M5-Mutter

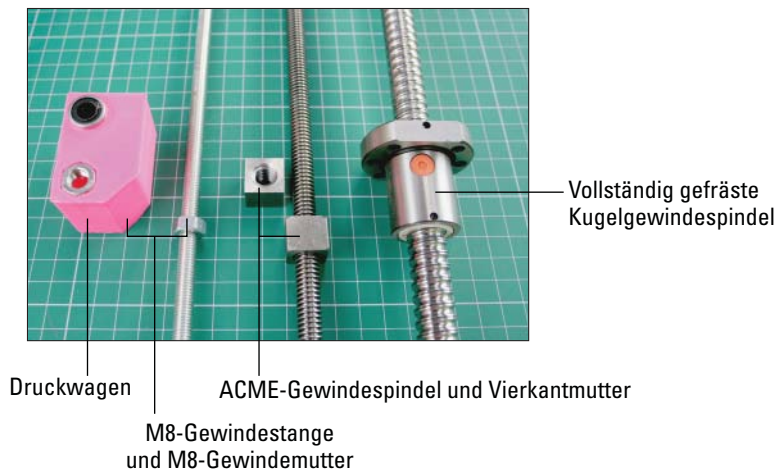


Abbildung 12.3: Die verschiedenen Bewegungssysteme für die vertikale Z-Achse

mit einem typischen Druckwagen, der die M8-Mutter aufnimmt. In der Mitte sehen Sie eine ACME-Gewindespindel. Diese ist speziell für die lineare Bewegung hergestellt und verwendet eine entsprechende Vierkantmutter. Diese Mutter müsste in einem 3D-gedruckten Wagen aufgenommen werden, ähnlich wie die M8. Rechts sehen Sie eine vollständig gefräste Kugelgewindespindel. Sie kann Bewegungen in hoher Geschwindigkeit realisieren. Dazu wird eine Spirale aus innenliegenden Kugellagern verwendet. Und sie kann gegebenenfalls auch für die Bewegung der anderen Achsen verwendet werden. Diese Lösung ist jedoch sehr viel teurer als die beiden anderen.

## Bewegung entlang der X- und Y-Achse

Die X- und Y-Bewegung eines 3D-Druckers muss so schnell wie möglich sein. Je schneller Sie den Druckkopf an verschiedenen Positionen der Druckplatte platzieren können, desto schneller können Sie 3D-Modelle erzeugen. Aus diesem Grund verwenden wir häufig Präzisionszahnriemen und Zahnriementriebe, die direkt mit der Motorwelle verbunden sind.

Wie bei der Z-Achse brauchen Sie auch für diese Bewegungen eine gute Auflösung, wir verwenden also normalerweise Riemen mit einem Zahnabstand von 5 mm oder 2,5 mm. Seit Kurzem sind auch 2-mm-Versionen sehr beliebt. Diese Zahnriemen besitzen feine Stahldrähte, die verhindern, dass sie sich ausdehnen. Irgendwann leiern sie aus, aber in der Regel kann man gut ein paar Jahre damit drucken.

Weniger gebräuchlich sind schnurbasierte Antriebssysteme, die extra starke Angelschnur verwenden, die um eine an der Motorwelle angebrachte gedruckte Spule gewickelt ist. Die Verwendung von Angelschnur, vor allem bei Delta-Druckern sehr beliebt, kann zahlreiche Vorteile mit sich bringen, unter anderem weniger Geräusche und eine höhere Geschwindigkeit. Außerdem kann die Schnur in der Regel stärker angezogen werden als Zahnriemen. Und sie kostet sehr viel weniger als ein Zahnriemen.

Abbildung 12.4 zeigt verschiedene Antriebssysteme für die X- und Y-Bewegung. Ganz links sehen Sie eine gedruckte Spule mit mehreren Wicklungen extrastarker Angelschnur, die sehr kostengünstig ist und sehr gleichmäßige und schnelle Bewegungen realisieren kann. Der schwarze GT-Zahnriemen mit 2,2 mm Zahnabstand in der Mitte ist heute eine beliebte Option für viele 3D-Drucker-Designs und -Bausätze. Hinten sehen Sie die weißen Riemen mit einem Zahnabstand von 2,5 mm, die in Europa häufig verwendet werden, sowie entsprechende Rollen aus Aluminium.



Abbildung 12.4: Eine Auswahl an Antriebssystemen für die X- und Y-Bewegung

Ein weiterer wichtiger Bestandteil des Bewegungssystems sind die Schienen, entlang derer sich die X-, Y- oder Z-Antriebe über eine gerade und flache Ebene bewegen. Diese Gleitstangen

(oder Bohrstangen) haben häufig einen Durchmesser von 8 oder 6 mm, aber abhängig von der Größe der Maschine können auch 10 mm oder mehr erforderlich sein. Diese Schienen werden häufig neben der Gewindestange oder dem Zahnriemen montiert. Der bewegte Wagen gleitet unter Verwendung von Linearlagern oder Buchsen (die 3D-gedruckt oder aus Messing hergestellt werden können) an diesen Gleitstangen entlang.

Linearlager werden professionell hergestellt und besitzen einen Ring kleiner Kugellager innerhalb eines umschließenden Metallkörpers. Diese Lager gleiten an der Stange entlang und sorgen für eine reibungslose Bewegung. Sie sind sehr langlebig, aber sie erzeugen bei der Bewegung ein Geräusch. Wenn Sie eine leisere Lösung bevorzugen, verwenden Sie am besten Messing oder 3D-gedruckte Buchsen. Die Buchsen verschleifen sehr viel schneller als Linearlager, aber Ersatzteile können zu sehr geringen Kosten 3D-gedruckt werden.

Abbildung 12.5 zeigt Stangen und Lager für den 3D-Druck. Links sehen Sie eine Gleitstange aus Edelstahl mit 8 mm, die in einer Z-Achsen-Montage verwendet wird: In den 3D-gedruckten Z-Wagen ist ein Linearlager eingefügt, das an der Stange nach unten und oben geschoben wird. Rechts sehen Sie eine Stahlstange mit 6 mm und eine 3D-gedruckte PLA-Buchse als kostengünstige und vollfunktionale Lösung.



Wenn Sie entscheiden, 3D-gedruckte Buchsen für Ihre Montage zu verwenden, um die lineare Bewegung zu realisieren, verwenden Sie unbedingt PLA als Material für die Buchse. Es ist hart und gleitet nach dem Aufsetzen reibungslos. Wenn Sie ABS verwenden, verschleifen die Buchsen innerhalb kürzester Zeit.



*Abbildung 12.5: Die Stangen und Lager in einem 3D-Drucker ermöglichen dem Wagen oder der Achse, reibungslos nach oben oder unten zu gleiten.*

Darüber hinaus können zahlreiche andere Arten professionell gefertigter Schienen und Stangen für die Bewegungssteuerung verwendet werden. Ein Beispiel werden Sie später in diesem Kapitel noch kennenlernen: Der MendelMax verwendet Linearschienen für die X-Achse und gestützte, gefräste Gleitstangen für die Y-Achse.

Das Bewegungssystem für Delta-basierte 3D-Drucker ist im Wesentlichen dasselbe wie für die X- oder Y-Achse eines kartesischen Systems, aber alle drei Achsen (X, Y und Z) sind identisch und bewegen sich vertikal an drei Punkten eines Dreiecks. Aufgrund der Art der Bewegung müssen der Riemen oder die Schnur häufig doppelt so lang sein, deshalb wird sehr häufig Angelschnur verwendet. Neben einem geringeren Geräuschaufkommen ist dies auch sehr viel kostengünstiger und platzsparender.

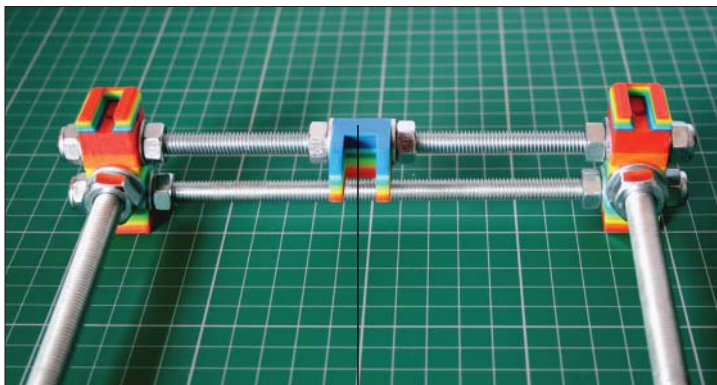
### Bau der Rahmenstruktur

Die Rahmenstruktur eines RepRap-3D-Druckers kann sich zwischen den verschiedenen Designs und Generationen unterscheiden, aber sie hat immer eine Aufgabe: Sie muss eine stabile, ebene und präzise Struktur bereitstellen, an der alle anderen Teile des 3D-Druckers befestigt werden können. Die folgende Liste beschreibt die Rahmenstruktur vier gebräuchlicher RepRap-Designs:

- ✓ **Gewindestange (Prusa i3):** Die ersten RepRap-3D-Drucker haben Gewindestangen für die Rahmenmontage verwendet, wodurch eine sehr präzise Dimensionierung mit der Stabilität und Einfachheit 3D-gedruckter Teile möglich ist.

Der untere Rahmen eines Prusa i3-Druckers wird aus M8- und M10-Gewindestangen angefertigt (siehe Abbildung 12.6). Sie können präzise eingestellt werden, um eine stabile Struktur zu schaffen. Dazwischen liegt die Montage für den Y-Antriebszahnriemen, an der ein Lager montiert wird, und um die der Riemen gelegt wird. Oben nehmen die 3D-gedruckten Teile die M8-Gleitstangen für die Y-Achse und die Druckplatte auf.

Der Prusa i3 verwendet außerdem zwei per Laser ausgeschnittene Teile für die Konstruktion. Das ist zum einen die Platte für die Y-Achse, die vor und zurück bewegt wird (siehe Abbildung 12.7). Das andere per Laser ausgeschnittene Teil, der Rahmen, muss sorgfältig von der Bewegung getrennt werden, um ein freies Gleiten zuzulassen. Glücklicherweise ist die Gewindestangenkonstruktion leicht anzupassen, um perfekte Abstände zu realisieren.



Montage für den Y-Antriebszahnriemen

Abbildung 12.6: Der untere Rahmen eines Prusa i3-Druckers

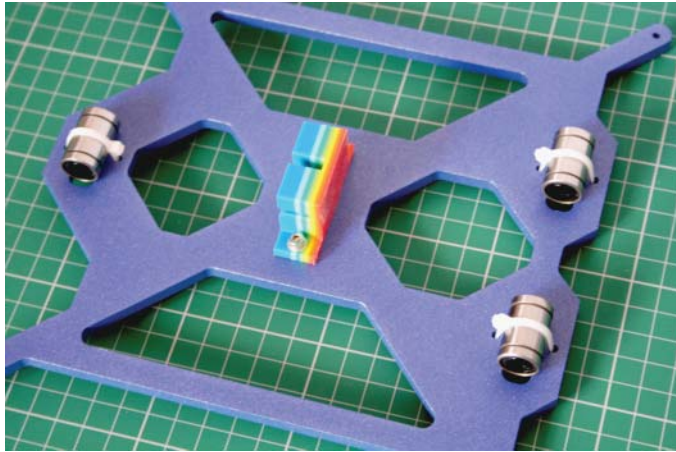


Abbildung 12.7: Die Y-Achsen-Platte aus 6 mm dickem Aluminium mit einfachen LM8UU-Linearlager, die mit Kabelbindern befestigt werden, und einer 3D-gedruckten Y-Riemenklammer, die am Rahmen verschraubt ist

Abbildung 12.8 zeigt die fertige Y-Achsen-Montage, jetzt mit Motor, einem GT-2-Zahnriemen und einer Antriebsrolle. Eine Seite des Riemens ist an der per Laser ausgeschnittenen Y-Achsen-Platte befestigt. An den Enden des Gewindestangenrahmens sind Gleitstangen (8 mm) befestigt, um eine Bewegung zu ermöglichen.

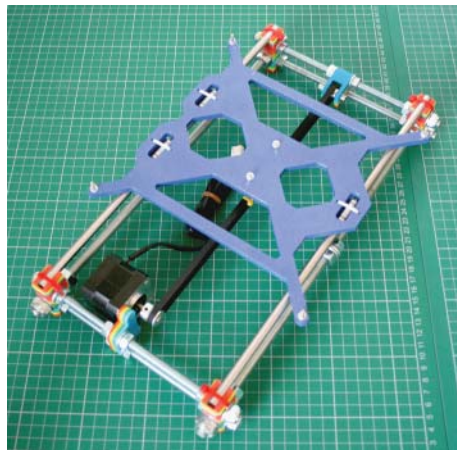


Abbildung 12.8: Die fertige Y-Achsen-Montage

- ✓ **Per Laser ausgeschnittener Aluminiumrahmen (MendelMax V2):** Das MendelMax V2-Design verwendet viele per Laser ausgeschnittene Aluminiumplatten und 20 mm breite Standardschienen aus extrudiertem Aluminium für die Hauptstruktur des 3D-Druckers (siehe Abbildung 12.9).





Abbildung 12.9: Rahmen eines MendelMax V2

Für den Aufbau des Rahmens werden Schrauben und eingeformte Muttern verwendet. Dennoch ist ein sorgfältiges Messen und Ausrichten erforderlich. Aus dieser Konstruktion entsteht ein sehr schwerer, aber solider Rahmen. Dies ist eine kostspieligere Methode, einen 3D-Drucker zu bauen, das Ganze sieht aber sehr professionell aus.

- ✓ **Per Laser ausgeschnittene Holzrahmen (RostockMax) für Delta-Drucker:** Der RostockMax-3D-Drucker verwendet fast nur per Laser ausgeschnittene Teile für seine Konstruktion (siehe Abbildung 12.10). Nur die vertikalen Abschnitte bestehen aus Aluminiumschienen. In die Holzteile sind Öffnungen für Standardmuttern und Schrauben eingeschnitten, sodass sie zu einer stabilen Struktur verschraubt werden können (siehe Abbildung 12.11).



Abbildung 12.10: Ein hochpräzises Puzzle aus Holzteilen für den Rahmen des 3D-Druckers RostockMax

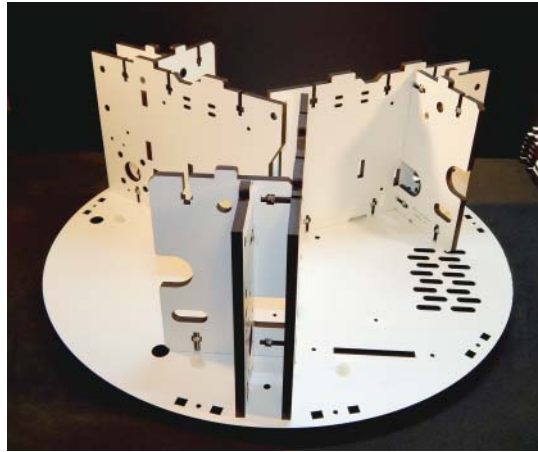


Abbildung 12.11: Die Abschnitte werden über eingeformte Muttern und Schrauben miteinander verbunden.

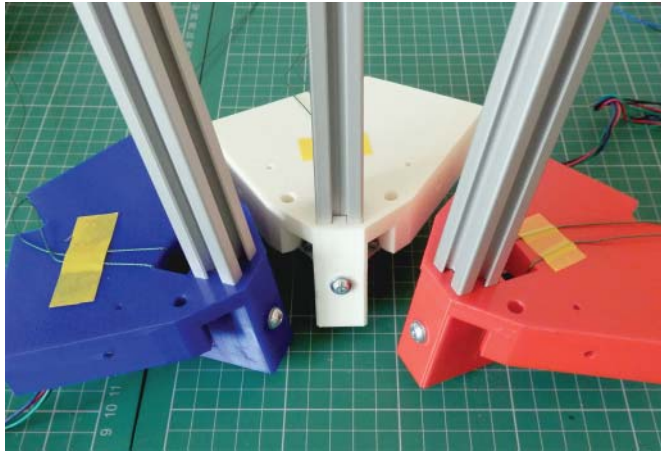
Elektronik, Netzteile und Verdrahtung können in jeweils speziell dafür vorgesehenen Abschnitten des Holzrahmens montiert werden, womit der fertige 3D-Drucker sehr ordentlich aussieht (siehe Abbildung 12.12).



Abbildung 12.12: Bei der Montage werden Aluminiumschienen angebracht, um die vertikale Höhe des Delta-Druckers zu erzeugen.

- ✓ **3D-gedruckter Rahmen (3DR) für einen Delta-Drucker:** Der 3DR-Delta-Drucker ist sehr viel kleiner als der RostockMax, denn sein Rahmen besteht hauptsächlich aus einer minimalen Menge an 3D-gedruckten Teilen, die einfach verschraubt werden (siehe Abbildung 12.13).





*Abbildung 12.13: Drei identische 3D-gedruckte Abschnitte nehmen vertikale Aluminiumschienen auf und können verschraubt werden.*

Für die Oberseite können ebenfalls drei identische Teile gedruckt werden – auch wieder in beliebigen Farben. Elektronik, Verdrahtung und Sensorkomponenten werden ebenfalls auf der 3D-gedruckten Rahmenkonstruktion angebracht (siehe Abbildung 12.14). Daraus entsteht ein solider Rahmen, an den die restlichen Druckerteile montiert werden können (siehe Abbildung 12.15).



*Abbildung 12.14: Die drei Motoren, die den Drucker antreiben, sind ebenfalls an den 3D-gedruckten Teilen angebracht.*

Der 3DR-Delta-Drucker besteht hauptsächlich aus 3D-gedruckten Teilen und kann ganz einfach geändert, erweitert oder sogar beliebig vergrößert oder verkleinert werden.

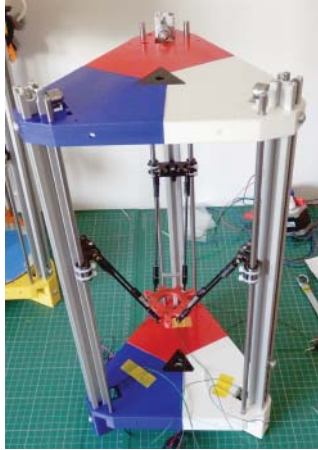


Abbildung 12.15: Der Rahmen für den 3DR-Delta-Drucker

## Montage des Y-Achsen-Rahmens für den Prusa i3

Als erstes Konstruktionsbeispiel zeigen wir den Rahmen für die Y-Achse (siehe Abbildung 12.6). Der Rahmen besteht aus vier gedruckten Eckteilen mit M8- und M10-Gewindestangen und -Muttern. Darauf setzt ein Rechteck aus Gleitstangen auf, entlang derer die Y-Achse vor- und zurückgleiten kann, angetrieben durch einen Schrittmotor.

Um den Rahmen für die Y-Achse zu bauen, gehen Sie wie folgt vor:

### 1. Bauen Sie den Seitenrahmen für die Y-Achse:

- a. Nehmen Sie eine der 380 mm langen M10-Gewindestangen und drehen Sie eine M10-Mutter etwa in die Mitte der Stange. Schieben Sie zwei M10-Unterlegscheiben darauf und drehen Sie eine weitere M10-Mutter auf, sodass die Unterlegscheibe zwischen zwei Muttern liegt, alles in etwa in der Mitte. Ziehen Sie sie nicht fest.
- b. Schrauben Sie eine weitere M10-Mutter an jedes Ende der M10-Stange auf etwa 45 mm.
- c. Schieben Sie auf jedes Ende eine M10-Unterlegscheibe und bringen Sie dann an jedem Ende der M10-Stange ein gedrucktes Y-Eckteil an. Überprüfen Sie die Ausrichtung des Y-Druckteils: Die M8-Öffnungen für die Aufnahme der Gleitstangen müssen nach oben und innen zeigen.
- d. Schieben Sie je eine M10-Unterlegscheibe auf jedes Ende der Gewindestange, sodass diese am gedruckten Teil anliegt.
- e. Schrauben Sie je eine M10-Mutter an jedes Ende der Stange. Jetzt können Sie die Teile von Hand festziehen, sodass die gedruckten Enden durch die M10-Muttern und -Unterlegscheiben gesichert werden.
- f. Wiederholen Sie das Ganze spiegelbildlich für die andere Seite der Y-Achse.

**2. Bringen Sie die Montage für das Antriebslager an:**

- a. Schieben Sie eine M4-Unterlegscheibe auf die 25 mm lange M4-Schraube und setzen Sie sie auf einer Seite der Antriebsmontage ein. Halten Sie dabei zwei 624ZZ-Lager in der Mitte der Montage. Drücken Sie die Schraube durch.
- b. Schieben Sie eine weitere M4-Unterlegscheibe auf und befestigen Sie sie mit einer weiteren M4-Mutter.

**3. Montieren Sie den vorderen und hinteren Rahmenteil der Y-Achse:**

- a. Nehmen Sie zwei der 210 mm langen M8-Gewindestange und schrauben Sie eine M8-Mutter auf ca. 45 mm an einem Ende jeder Stange auf. Schieben Sie eine M8-Unterlegscheibe auf die Stange gegen die Mutter.
- b. Setzen Sie die Enden der M8-Stangen in die Y-Achse ein, wobei die gedruckten Eckteile nach oben zeigen, neben den beiden M8-Muttern und Unterlegscheiben.
- c. Sichern Sie die Stange unter Verwendung einer weiteren Unterlegscheibe und einer M8-Mutter an dem gedruckten Y-Eckteil und ziehen Sie das Ganze von Hand fest.
- d. Schieben Sie eine Mutter und eine Unterlegscheibe in die Mitte jeder Stange und schieben Sie dann die Y-Motormontage auf, sodass sie nach innen zeigt.
- e. Sichern Sie die Montage mit zwei Unterlegscheiben und Muttern links und rechts von dem Druckteil und ziehen Sie diese von Hand fest.
- f. Wiederholen Sie die Schritte a. bis e. für das andere Ende der M10-Stangen.
- g. An diesem Ende schieben Sie die gedruckte Antriebsmontage auf, ebenfalls nach innen zeigend. Wiederholen Sie Schritt e., um den Antrieb in der Mitte der Stangen zu sichern.
- h. Wiederholen Sie die Schritte a. bis e., um das dritte und das vierte Eckteil an den anderen Enden der Stangen anzubringen.

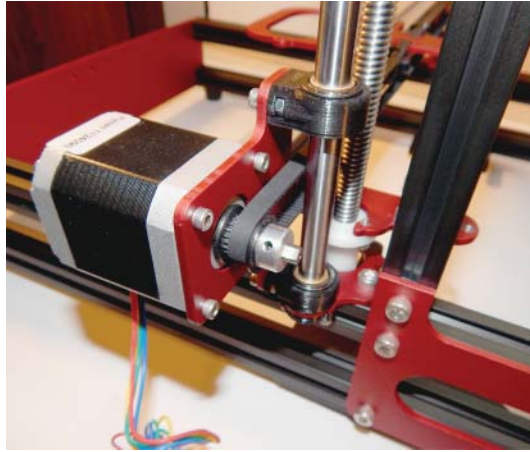
**4. Messen Sie nach und ziehen Sie den Rahmen fest.**

Damit sollte Ihre Antriebsmontage wie in Abbildung 12.6 gezeigt aussehen.

## *Montage der beweglichen Achse*

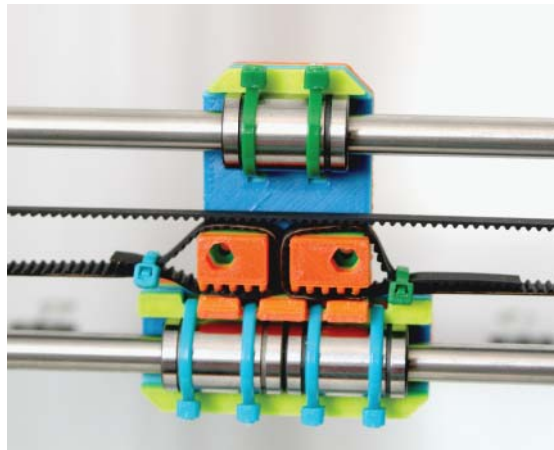
Nach dem Aufbau des Hauptrahmens beginnt im nächsten Schritt die Montage des beweglichen Achsensystems. Kartesische 3D-Drucker verwenden häufig sehr ähnliche Bewegungssysteme. (In Abbildung 12.6 und Abbildung 12.7 sehen Sie die Montage der beweglichen Y-Achse für einen Prusa i3.) Die bewegliche Y-Achse eines MendelMax V2 beispielsweise verwendet eine ähnliche Montage wie der Prusa i3 (siehe Abbildung 12.6 und Abbildung 12.7), außer dass der MendelMax V2 statt der separaten Gleitstangen des Prusa i3 und der Lager eine geformte Schiene und ein Linearlagersystem verwendet. Analog dazu verwenden die Z-Achsen- und X-Achsen-Montagen von Prusa i3 und MendelMax vergleichbare Designs, aber der MendelMax V2 verwendet keine 3D-gedruckten Teile.

Abbildung 12.16 zeigt die Montagen für die X-Achse und die vertikale Z-Achse eines MendelMax V2. Der MendelMax V2 verwendet Platten für die Montage und eine ACME-Gewindespindel, und sein Z-Motor ist oben angeordnet. Ansonsten ist er dem in Abbildung 12.2 gezeigten Prusa i3 sehr ähnlich.



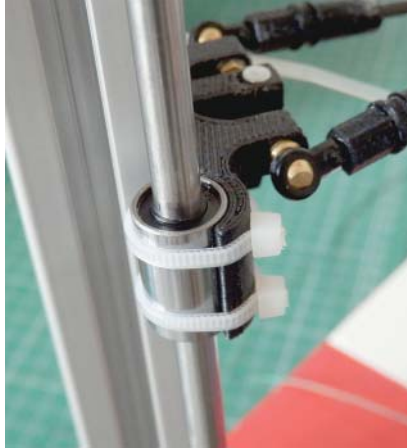
*Abbildung 12.16: Die Montagen für die X-Achse und die vertikale Z-Achse für einen MendelMax V2, die mit denjenigen des Prusa i3 vergleichbar sind*

Der Zahnriemen oder der Angelschnurantrieb müssen an den Plattformen gesichert werden. Dazu wird die Schnur eingespannt, mit dem Wagen eingeklemmt, straff gezogen und dann mit Schrauben oder einem einfachen Kabelbinder gesichert (siehe Abbildung 12.17).



*Abbildung 12.17: Ein GT-2-Zahnriemen wird am X-Wagen des Prusa i3 gesichert, indem Kabelbinder um das 3D-gedruckte Teil gezogen werden.*

Delta-Drucker müssen drei Wägen und eine Hauptplattform bewegen. Für ein 3DR-Modell erfolgt dies, indem die einzelnen beweglichen Wägen an Gleitstangen nach oben und unten bewegt werden (siehe Abbildung 12.18). Damit sich der auf der Delta-Hauptplattform befestigte Druckkopf bewegen kann, befinden sich an den anderen Enden der Gelenkteile Wägen, die an den glatten Stangenmontagen befestigt sind. Diese bewegen sich nach oben und unten und schieben die Hauptkartusche im 3D-Raum umher.



*Abbildung 12.18: Ein Wagen an einer Stange eines 3DR-Druckers.  
Diese bewegen sich nach oben und unten und schieben den Hauptwagen im 3D-Raum umher.*

Für den RostockMax laufen die Lager direkt an den Außenseiten der Aluminiumschienen, aus denen er gebaut ist.

Für die eigentlichen Wägen muss ein Gelenkteil verwendet werden, sodass die Hauptplattform mit dem Hot-End des Extruders Bewegungsfreiheit auf der Druckplattform hat. Diese Gelenkteile können 3D-gedruckt werden, aber genau wie gedruckte PLA-Buchsen verschleißen sie schnell. Außerdem bewegen sie sich lockerer und weniger präzise, wenn sie verschleißen. Um zu lockere Montagen zu kompensieren, verwenden wir häufig eine Feder, die die Gelenke zusammenzieht. Auf diese Weise entsteht weniger Durchhang im mechanischen System und die Positionsgenauigkeit der Bewegungen wird verbessert. Die 3D-gedruckte Hauptplattform des 3DR-Delta-Druckers verwendet Gelenkteile aus Messing und Nylon, die volle Bewegungsfreiheit unterstützen und die Druckerdüse an beliebigen Stellen auf der Druckplattform platzieren können. Federn werden häufig verwendet, um Durchhänge (auch als *Spiel* bezeichnet) für Gelenke zu vermeiden (siehe Abbildung 12.19).

Nachdem die Wägen befestigt und die Zahnriemen oder die Angelschnur angebracht sind, können die Motoren die Bewegung der Hauptplattform steuern. (Die fertige Montage für das Bewegungssystem sehen Sie in Abbildung 12.15.)

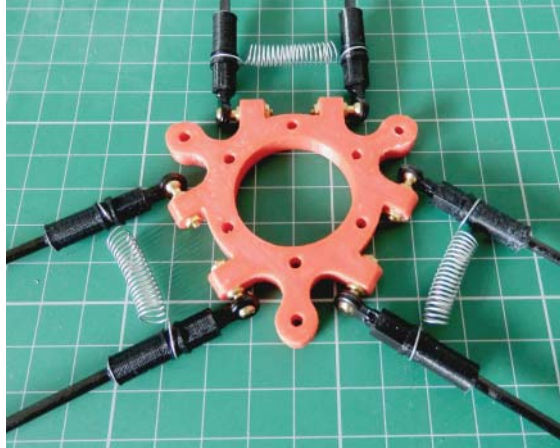


Abbildung 12.19: Die 3D-gedruckte Hauptplattform eines 3DR-Delta-Druckers

### Montage der beweglichen Y-Achse des Prusa i3

Für unser Konstruktionsbeispiel bringen wir jetzt an dem zuvor gefertigten Grundrahmen die beweglichen Elemente an. Hier verwenden wir Linearlager und Gleitstangen für die Bewegung der Y-Achse.

Um die bewegliche Y-Achse zu montieren, gehen Sie wie folgt vor:

#### 1. Bringen Sie die Linearlager an der per Laser ausgeschnittenen Y-Achsen-Platte an:

- a. Bringen Sie drei LM8UU-Linearlager an der Y-Achsen-Platte an. Sie sollten in den rechteckigen Ausschnitten der per Laser ausgeschnittenen Platte sitzen.
- b. Sichern Sie diese Lager mit einem Kabelbinder.
- c. Bringen Sie 20 mm lange M3-Schrauben und M3-Muttern in jeder Ecke der Y-Achsen-Platte an. Der Schraubenkopf sollte sich zusammen mit den Linearlagern an der Unterseite befinden.

#### 2. Montieren Sie die Gleitstangen und die Y-Riemenklemme:

- a. Bringen Sie die gedruckte Y-Riemenklemme mit zwei 20 mm langen M3-Schrauben an der per Laser ausgeschnittenen Platte auf der Seite an, an der auch die Linearlager befestigt sind.
- b. Schieben Sie die beiden 350 mm langen Gleitstangen sehr vorsichtig in die Linearlager. (Eine Seite hat ein Lager, die andere zwei.)

Anschließend sieht Ihre bewegliche Y-Achsen-Platte wie in Abbildung 12.7 gezeigt aus.



**3. Bringen Sie den Motor für die Y-Achse und die Y-Achsen-Platte am Rahmen an:**

- a. Bringen Sie einen NEMA 17-Motor an der gedruckten Motormontage an, die bereits am Rahmen angebracht ist. Verwenden Sie für die Befestigung zwei 16 mm lange M3-Schrauben. Schieben Sie eine GT2-Rolle auf die Motorwelle und befestigen Sie sie mit einer Stockschraube.
- b. Bringen Sie die Gleitstangen und die bewegliche Achsenmontage an den vier gedruckten Eckteilen an. Es sollte offensichtlich sein, in welche Ausschnitte sie eingefügt werden müssen. Möglicherweise müssen Sie den Rahmen aus den M10-Gewindestangen lockern oder anziehen, damit sie passen.
- c. Bringen Sie Kabelbinder um die Gleitstangenenden und die Druckereckteile an, um sie zu sichern.
- d. Drehen Sie den ganzen Wagen um, sodass das Druckbett nach unten zeigt.
- e. Legen Sie den GT2-Zahnriemen um das Antriebslager und führen Sie ihn entlang der Rahmenunterseite zum Motor. Anschließend ziehen Sie ihn um die Motorrolle und zurück in die Mitte.
- f. Sichern Sie die beiden Enden an der gedruckten Riemenklemme und befestigen Sie sie mit Kabelbindern aneinander. Ziehen Sie die Kabelbinder noch nicht vollständig fest, weil wir den Rahmen ausrichten und die Winkel korrekt ausrichten, bevor wir den Riemen anziehen.

**4. Richten Sie den Rahmen aus und ziehen Sie Rahmen und Riemen an:**

- a. Jetzt ist alles von Hand angezogen und kann leicht angepasst werden. Als Erstes passen Sie die M10-Stangen an, sodass die Gleitstangen sicher in ihrem Ausschnitt oben an den gedruckten Eckteilen sitzen. Ziehen Sie sie fest, aber nicht zu stark, damit Sie das gedruckte Teil nicht quetschen. Wir wollen nicht, dass sie kaputt gehen.
- b. Jetzt richten Sie die M8-Gewindestangen so aus, dass die Gleitstangen an jedem Ende einen Abstand von 162 mm haben. Sie müssen unbedingt parallel verlaufen, damit die Linearlager reibungslos an den Gleitstangen laufen können und sich nicht verkeilen.
- c. Richten Sie die Motormontage so aus, dass sie an der richtigen Position an den Gewindestangen sitzt. Diese Position kann sich abhängig von der Art der gedruckten Riemenklemme unterscheiden. Achten Sie darauf, dass der GT2-Riemen an beiden Enden bündig verläuft.
- d. Gleichzeitig passen Sie die Position der Antriebsmontage an, um für einen bündigen Riemen zu sorgen.
- e. Kontrollieren Sie, dass alles fest sitzt, und überprüfen Sie noch einmal, ob alle Abstände an den Seiten sowie vorne und hinten am unteren Y-Achsen-Rahmen korrekt sind.

Nach diesen Schritten sollte Ihre bewegliche Y-Achse wie in Abbildung 12.8 gezeigt aussehen.

## Montage der beweglichen Z- und Y-Achsen des Prusa i3

Der nächste Schritt in unserer Beispielkonstruktion ist der Aufbau der zweiten per Laser ausgeschnittenen Achse. Dabei werden die vertikale Z-Achse und die horizontale X-Achse montiert. Die Tabellen 12.3 und 12.4 listen die Teile auf, die Sie dafür benötigen.

Teil	Details	Menge
X-Endantrieb	Wird in Kombination mit den M8-Gleitstangen eingesetzt, um die X-Achse zu bilden	1
Montage für Motor am X-Ende	Wird in Kombination mit den M8-Gleitstangen und dem Motor eingesetzt, um die X-Achse zu bilden	1
Montage für die Z-Achse oben links	Hält die vertikalen M8-Gleitstangen für die Montage der Z-Achse	1
Montage für die Z-Achse oben rechts	Hält die vertikalen M8-Gleitstangen für die Montage der Z-Achse	1
Montage für die Z-Achse unten links	Hält die vertikalen M8-Gleitstangen und den Motor	1
Montage für die Z-Achse unten links	Hält die vertikalen M8-Gleitstangen und den Motor	1

*Tabelle 12.3: Gedruckte Teile für die Montage der oberen Z- und X-Achsen*

Für die Montage gehen Sie wie folgt vor:

### 1. Montieren Sie den X-Antrieb:

- Schieben Sie die 25 mm M4-Schraube zusammen mit einer M4-Unterlegscheibe in das Druckteil für den X-Antrieb.
- Während Sie die Schraube hineinschieben, bringen Sie eine M4-Unterlegscheibe, ein 624ZZ-Lager und eine weitere M4-Unterlegscheibe an der Innenseite des Druckteils für den X-Antrieb an.
- Bringen Sie eine M4-Unterlegscheibe und eine M4-Mutter am Ende der M4-Schraube an.
- Drücken Sie zwei LM8UU-Linearlager an der Antriebsmontage an. Möglicherweise müssen Sie dafür etwas Kraft anwenden, achten Sie aber darauf, das Kunststoffteil nicht zu beschädigen.

### 2. Bereiten Sie die X-Enden mit Linearlagern vor:

- Drücken Sie zwei der LM8UU-Linearlager auf die Montage des X-Motors. Seien Sie wie an der Antriebsseite vorsichtig bei der Montage.
- Schieben Sie zwei LM8UU-Linearlager auf eine der 320 mm M8-Gleitstangen. Schieben Sie ein weiteres LM8UU-Linearlager auf die andere 320 mm Gleitstange.

Teil	Beschreibung	Typ	Menge
Gewindestange	M5-Stangen 245 mm – für die Bewegung der Z-Achse	Stange – Stahl oder Edelstahl	4
Per Laser ausgeschnittene X-Achsen-Platte	Der große per Laser ausgeschnittene Aluminiumrahmen	6 mm Aluminium	1
Gleitstange	320 mm M8-Gleitstange für die Bewegung der X-Achse	Gleitstange – Stahl oder Edelstahl	2
Gleitstange	370 mm M8-Gleitstange für die Bewegung der Z-Achse	Gleitstange – Stahl oder Edelstahl	2
Linearlager	LM8UU-Linearlager für die Bewegung der X- und Z-Achse	Bewegung	7
Kugellager	624ZZ-Kugellager für den Riemenantrieb der X-Achse	Bewegung	1
M4-Schraube	25 mm M4-Schraube für den Antrieb	Befestigung	1
M4-Mutter	Glatte M4-Mutter oder Kontermutter	Befestigung	1
M4-Unterlegscheibe	Gerade M4-Unterlegscheibe	Befestigung	6
M5-Mutter	Gerade Mutter M4, weil diese für die Z-Bewegung verwendet wird	Befestigung/ Bewegung	2
M3-Schraube	16 mm M3-Schraube für die Befestigung	Befestigung	16
M3-Unterlegscheibe	Gerade Unterlegscheibe Größe M4	Befestigung	6
NEMA 17-Motor	NEMA 17-Motor für 1,2 bis 2,5 A	Bewegung	3
GT2-Ritzel	Für die Montage auf dem NEMA 17-Motor für die X-Achse	Bewegung	1
5 mm Schlauch	Zwei 20-mm-Abschnitte flexibler 5-mm-Schlauch – für die Verbindung der Motoren mit M5-Gewindestangen	Bewegung	2
Kabelbinder	Kabelbinder 100 mm, 3,2 mm stark für die Sicherung der Linearlager und des Antriebsrahmens	Befestigung	8

*Tabelle 12.4: Mechanische Teile für die Montage der oberen X- und Z-Achsen*

- c. Bringen Sie die Enden der Gleitstangen in den Enden des X-Motors und des X-Antriebs an. Seien Sie dabei vorsichtig, weil diese sehr fest sitzen und vollständig eingeschoben werden müssen.

**3. Verbinden Sie die X- und Z-Achsen. Gehen Sie wie nachfolgend beschrieben vor und orientieren Sie sich dabei an Abbildung 12.2:**

- a. Schieben Sie die beiden 370 mm Gleitstangen in die LM8UU-Linearlager, die an den Enden der X-Achse befestigt wurden.
- b. Drücken Sie die gedruckten Montagen oben links und oben rechts auf die oberen Enden der beiden 370 mm M8-Gleitstangen.
- c. Drücken Sie die gedruckten Montagen unten links und unten rechts auf die oberen Enden der beiden 370 mm M8-Gleitstangen.

**4. Bringen Sie die Z- und X-Achsen an dem per Laser ausgeschnittenen Rahmen an:**

- a. Bringen Sie die montierte Achse über dem per Laser ausgeschnittenen Rahmen an.
- b. Befestigen Sie die untere und obere ausgedruckte Montage für die Z-Achse mit acht 16 mm langen M3-Schrauben an dem per Laser ausgeschnittenen Rahmen an.

**5. Bringen Sie den X-Wagen an:**

- a. Bringen Sie den gedruckten X-Wagen an den drei Linearlagern an, die zuvor an den horizontalen X-Gleitstangen befestigt wurden.
- b. Sichern Sie den Wagen mit sechs Kabelbindern an den LM8UU-Linearlagern, wie in Abbildung 12.17 gezeigt.

**6. Bringen Sie den Motor und den Antriebsriemen für die Bewegung der X-Achse an. Gehen Sie wie nachfolgend beschrieben vor und orientieren Sie sich dabei an Abbildung 12.7:**

- a. Bringen Sie einen NEMA 17-Motor unter Verwendung von drei 16 mm langen M3-Schrauben an der Montage für den X-Motor an.
- b. Schieben Sie eine GT2-Rolle auf die Motorwelle und sichern Sie sie mit einer Stockschraube.
- c. Legen Sie den zweiten GT2-Antriebsriemen um die GT2-Rolle am Motor, führen Sie ihn in Richtung des X-Wagens. Das andere Ende des Riemens muss um das X-Antriebslager gelegt werden und in der Mitte mit dem ersten Ende zusammengeführt werden.
- d. Befestigen Sie den Riemen mit Kabelbindern sicher am X-Wagen, wie in Abbildung 12.17 gezeigt.

**7. Bringen Sie die vertikalen Antriebsmotoren und die feingängigen M5-Antriebsschrauben für die Z-Bewegung und das Anheben und Absenken des X-Wagens an. Gehen Sie wie nachfolgend beschrieben vor und orientieren Sie sich dabei an Abbildung 12.2:**

- a. Bringen Sie einen NEMA 17-Motor unter Verwendung von drei 16 mm langen M3-Schrauben an jeder der unteren Montagen für den Z-Motor an.

- b. Drehen Sie eine M5-Mutter auf jede M5-Gewindestange.
- c. Schieben Sie 10 mm Schlauch auf ein Ende jeder M5-Gewindestange.
- d. Setzen Sie die 10 mm Schlauch auf die Z-Motorwelle auf. Sie müssen den X-Wagen anheben oder ihn zur Seite halten, um Zugang zu den Komponenten zu haben.
- e. Schließlich richten Sie die M5-Gewindestange an der Montage für den X-Achsen-Motor und den Antrieb aus. Die M5-Muttern müssen in die Kunststoffmontagen gedrückt werden, und die X-Achse liegt auf diesen Muttern auf.

## Verbindung der Z-, X- und Y-Achsen

Nachdem Sie die Z/X-Achsen und eine separate X-Achse montiert haben, müssen Sie beide Rahmenteile verbinden, alles ausrichten und festziehen. Die Metallplatte der Z/X-Achsen wird zusammen mit den M10-Muttern und Unterlegscheiben im mittleren Abschnitt der Y-Achse befestigt, wie nachfolgend beschrieben:

- 1. Schieben Sie die montierte Y-Achse in die Mitte des vertikalen (per Laser ausgeschnittenen) Z/X-Rahmens und senken Sie ihn ab, sodass die M10-Stangen in die Ausschnitte des Rahmens einrasten.**
- 2. Sorgen Sie dafür, dass sich an jeder Seite des Aluminiumrahmens eine M10-Mutter und eine Unterlegscheibe befinden.**
- 3. Messen Sie die M10-Gewindestange an jeder Seite und richten Sie den Aluminiumrahmen in der Mitte der Stange aus.**

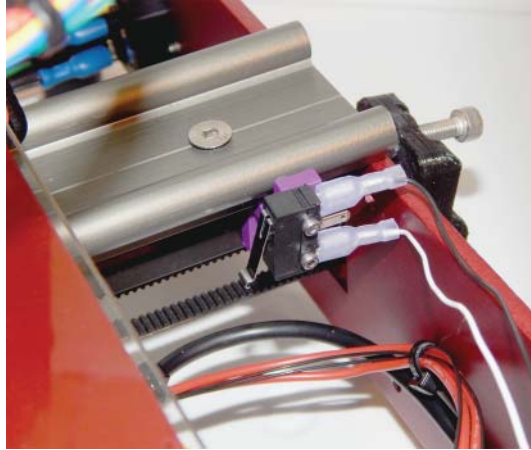
Hier ist es nicht wichtig, genau die richtige Mitte zu verwenden, weil das Ganze nach Anbringung des Extruders noch ausgerichtet wird. Wenn Sie sich an der Ausgangsposition (0, 0, 0) befinden, sitzt die Extruderdüse in der vorderen linken Ecke der Druckplatte. Dieser Abstand ist spezifisch für den Typ des verwendeten Extruders und des Hot-Ends.

- 4. Ziehen Sie die M10-Muttern so fest an, dass der Rahmen nicht auseinanderfällt, wenn Sie im nächsten Kapitel die Elektronik anbringen.**

## Die Home-Position einstellen

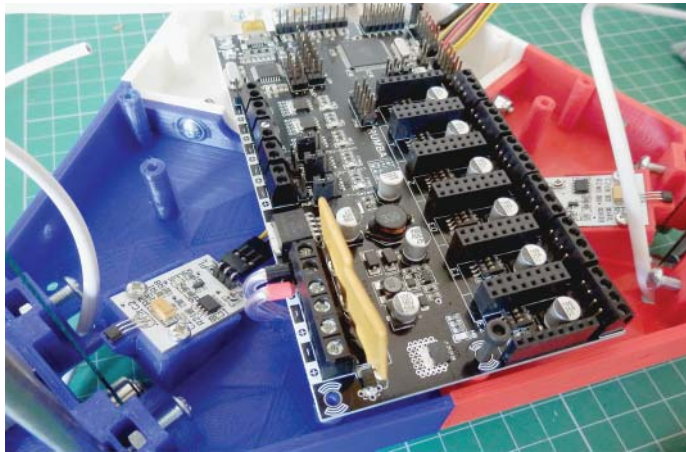
Damit ein 3D-Drucker weiß, wo sich sein Druckkopf gerade befindet, braucht er einen Bezugspunkt, die sogenannte *Home-* oder *Startposition*. Bevor ein 3D-Drucker zu drucken beginnt, ermittelt er zunächst seine Home-Position. Das ist sehr wichtig, weil sich der Druckkopf überall auf der Druckplattform befinden kann. Um sicherzustellen, dass sich der Druckkopf an einer bekannten Position befindet, verwenden wir einen Sensor oder einen Schalter am Ende jeder Achse. Der Schalter wird ausgelöst, wenn der Druckkopf seine Home-Position erreicht hat (siehe Abbildung 12.20).

Für Delta-Drucker befindet sich die Home-Position ganz oben an der Maschine. Die Schalter oder Sensoren sind normalerweise an den oberen Rahmen der drei vertikalen Arme befestigt.



*Abbildung 12.20: Am Ende der Y-Achsen-Montage des MendelMax V2 ist ein kleiner Mikroschalter angebracht, sodass die Elektronik des 3D-Druckers weiß, wann die Achse die Home-Position erreicht hat. Solche Schalter müssen an jeder Achse befestigt werden.*

Wenn sich die Wägen nach oben bewegen, treffen sie nacheinander jeden Sensor und erkennen die Home-Position (siehe Abbildung 12.21).

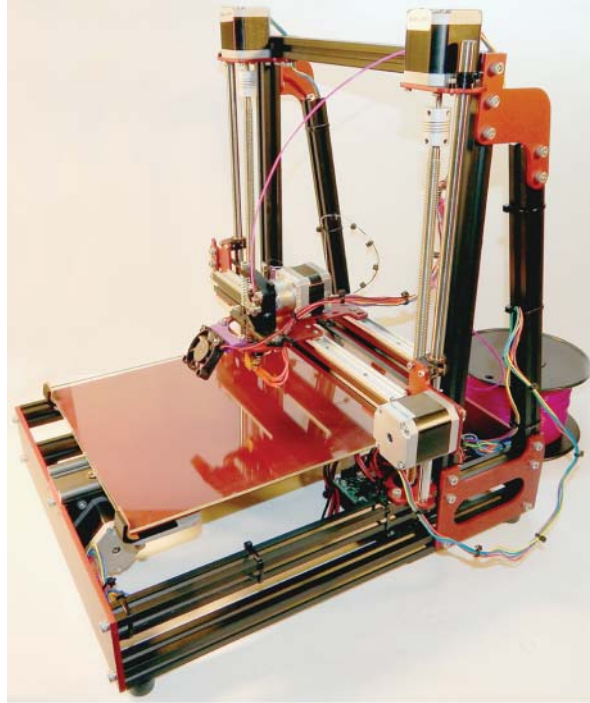


*Abbildung 12.21: Die obere Unterseite eines 3DR-Delta-Druckers. Links erkennt die kleine weiße Platine (eine von drei) die Home-Position magnetisch. Hier ist die Hauptplatine für die Elektronik bereit für die Verdrahtung.*

Nachdem die gesamte Rahmenkonstruktion und alle beweglichen Achsensysteme verbunden sind, kann die Verdrahtung der Elektronik beginnen. Auch dies ist nicht so kompliziert, wie



es sich anhören mag. Die Elektronik ist modular und die Verdrahtung ist ganz einfach. Wenn Sie mit der Verdrahtung fertig sind, ist auch Ihr 3D-Drucker fertig (siehe Abbildung 12.22).



*Abbildung 12.22: Der fertige und montierte MendelMax V2-3D-Drucker, bereit für die Kalibrierung*

# Die Steuerelektronik des RepRap

# 13

## In diesem Kapitel

- ▶ Sich einen Überblick über die RepRap-Elektronik verschaffen
- ▶ Modulare Komponenten, Sensoren und Motoren betrachten
- ▶ RepRap-Verdrahtung und -Anschlüsse kennenlernen
- ▶ Die Firmware-Konfiguration verstehen

Für die Entwicklung und Optimierung der Elektronik und der Firmware für den Betrieb eines RepRap-3D-Druckers wurden Tausende von Mannstunden aufgewendet, bis schließlich eine funktionierende Maschine entstand. In diesem Kapitel beschäftigen wir uns mit der allgemeinen RepRap-Elektronik, sehen uns die Firmware für den Betrieb der Elektronik genauer an und erklären, wie all dies zusammenspielt, um einen 3D-Drucker zu betreiben. Außerdem betrachten wir die Verdrahtung, Upgrades und optionale Teile sowie Sensoren und Motoren, die für die unabdingbare mechanische Bewegung sorgen.

## RepRap-Elektronik – ein Überblick

Für einen 3D-Drucker brauchen Sie zuverlässige und stabile Elektronik. Sie bildet das Kernstück der komplexen mechanischen Funktion und muss einfach zuverlässig funktionieren, während Sie stundenlang darauf warten, dass ein Druckteil fertig gedruckt ist.

Die RepRap-Elektronik ist aus dem Open Source-Projekt Arduino entstanden. Arduino ist eine dem Industriestandard entsprechende eingebettete Platine, die für alle möglichen Anwendungen eingesetzt werden kann, von industriellen Steuerungssystemen bis hin zu Robotik und Hobby-Elektronik, für selbstgesteuerte Drohnen und tragbare Elektronikgeräte. Die Elektronik für einen RepRap wird normalerweise in Form einer Arduino-Standardplatine und zusammen mit spezifischen Optionen für 3D-Druck-Elektronik, Treibern und Sensoren bereitgestellt, oder als Komplettsset, das immer noch auf Arduino basiert, aber speziell auf den RepRap und allgemein den 3D-Druck ausgelegt ist.



Lassen Sie sich nicht von den vielen verschiedenen Möglichkeiten für die RepRap-Elektronik erschrecken! Im Wesentlichen unterstützen sie alle dieselben Funktionen und verwenden ähnliche Firmware. Sie basieren alle auf Arduino, sind also relativ gebräuchlich und kompatibel. Abweichungen gibt es hauptsächlich aufgrund bestimmter Leistungsmerkmale sowie der Anzahl der Ausgänge. Wenn Sie neben der hier vorgestellten Standardelektronik weitere Dinge ausprobieren wollen, achten Sie einfach darauf, dass das Design moderne Firmware unterstützt, wie beispielsweise Marlin oder Sprinter, bevor Sie sie kaufen.

## RAMPS

Die heute gebräuchlichste Elektronik ist eine Kombination aus der Steuerplatine Arduino MEGA 1280 oder 2560 und einem Open Source-RepRap-»Shield«, RAMPS (RepRap Arduino MEGA Pololu Shield), das von Johnny Russell bei Ultimachine entwickelt wurde (siehe Abbildung 13.1). Oben in Abbildung 13.1 sehen Sie das RAMPS-»Shield«, das in die später in diesem Kapitel gezeigte Arduino MEGA-Platine eingesteckt wird.

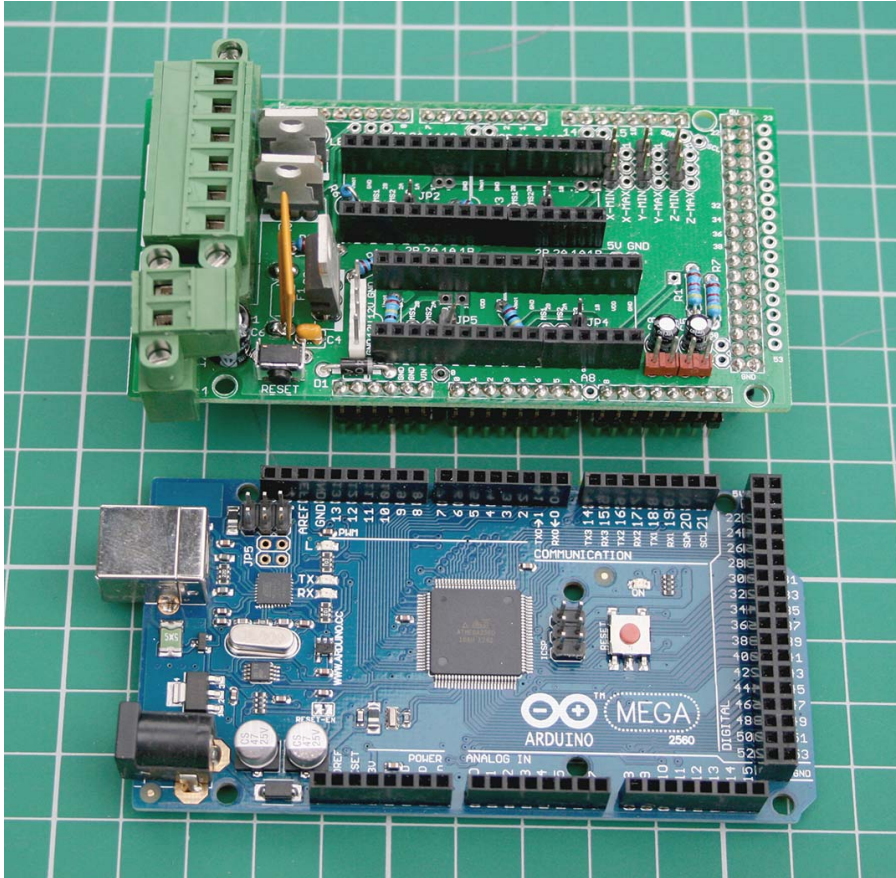


Abbildung 13.1: RepRap RAMPS und Arduino, ein vollfunktionaler kompakter 3D-Druck-Controller für LCD-Bildschirme, Tastaturen und mehrere Extruder

## RAMBo

RAMBo (siehe Abbildung 13.2), eine Weiterentwicklung der RAMPS-Elektronik, verwendet ein Universalformat und besitzt zahlreiche neue Funktionen. RAMBo wird bei den Bausatzanbietern und -benutzern immer beliebter, heute vor allem in den USA. Bei RAMBo sind die



Abbildung 13.2: RAMBo kombiniert Arduino MEGA und ein RAMPS-Shield zu einem kompakten Board.

Schrittmotortreibergeräte permanent auf dem Board befestigt und werden nicht als separate Module bereitgestellt. Damit werden die Kosten gesenkt, aber wenn ein Treibergerät defekt ist, kann es sein, dass die gesamte Platine nicht mehr benutzt werden kann. Bei Verwendung separater Motor-Treibermodule (wie im nachfolgenden Abschnitt gezeigt) können Sie ein beschädigtes Modul austauschen oder Upgrades mit feinauflösenderen Modulen vornehmen.

## Sanguinololu

Sanguinololu (siehe Abbildung 13.3) ist eines der originalen, einfach zu bauenden Elektronik-Sets für RepRap-Drucker. Und weil es eines der kleinsten und kostengünstigsten Elektronik-Sets für RepRap-Drucker ist, ist es optimal für den Hobby-Anwender geeignet. Wie bereits gezeigt, kann es mit einem komplett grafikfähigen LCD-Display und einem Speicherkarteneinschub kombiniert werden, sodass Sie völlig ohne Computer drucken können. Es ist immer noch sehr beliebt. Sie können es zuhause aus selbst beschafften Komponenten bauen. Neuere Weiterentwicklungen dieses Designs sind unter anderem das Melzi-Board, das für die Massenfertigung unter Verwendung von auf der Oberfläche montierten Komponenten entworfen wurde.

## Minitronics

Minitronics ist eine Weiterentwicklung von Sanguinololu, wobei der Schwerpunkt auf die Mindestanforderungen für den Betrieb eines 3D-Druckers mit einem Extruder gelegt wurde. Es unterstützt kaum Erweiterungsoptionen, ist aber das kompakteste Elektronikpaket, das

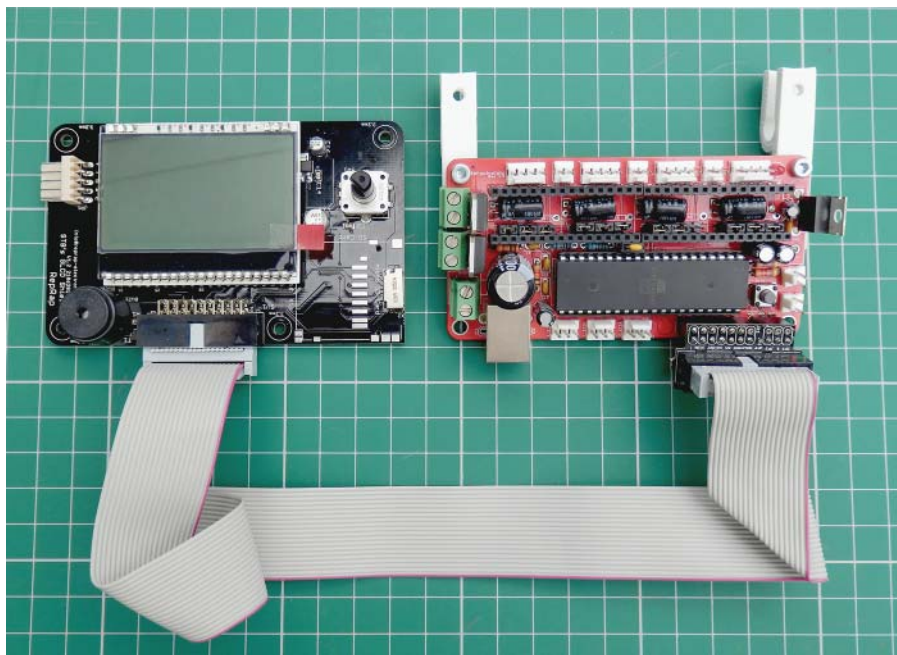


Abbildung 13.3: Sanguinololu, eines der kleinsten und kostengünstigsten Elektronik-Sets für RepRap

es für 3D-Drucker gibt. Das Minitronics-Board ist winzig; alles ist integriert. Es kann in Massenproduktion hergestellt werden und weist die niedrigsten Komponentenkosten auf, sodass es ideal für 3D-Drucker für den Verbraucher geeignet ist (siehe Abbildung 13.4).



Immer mehr Elektronik-Boards für RepRap-Drucker werden immer weiter integriert, aber im Allgemeinen ist es besser, eine modulare Elektronik zu verwenden. Diese kann besser aufgerüstet oder ausgetauscht werden, wenn ein Teil ausfällt oder beschädigt wird. Ein Motortreiber kann kaputt gehen, wenn Sie also eine Elektronik verwenden, bei der die Treiber aufgelötet sind (statt in einem austauschbaren Modul untergebracht zu sein), besteht das Risiko, dass das Board nicht repariert werden kann.

## RUMBA

RUMBA ist ein weiteres integriertes Board mit vielen Optionen für die zukunftsichere Erweiterung (da es einfach aufzurüsten ist). Es stellt eine gute Wahl für RepRap-Entwickler dar. Sein modulares Design erlaubt jederzeit eine Änderung oder Erweiterung, und es kann bis zu drei separate Extruder steuern (siehe Abbildung 13.5). Dieser Controller verwendet Schrittmotoren wie RAMPS. Außerdem gibt es dafür Zusatzplatinen für ein LCD-Display, Speicherkartenmodule und Thermokoppler, die seine Funktionalität erweitern.



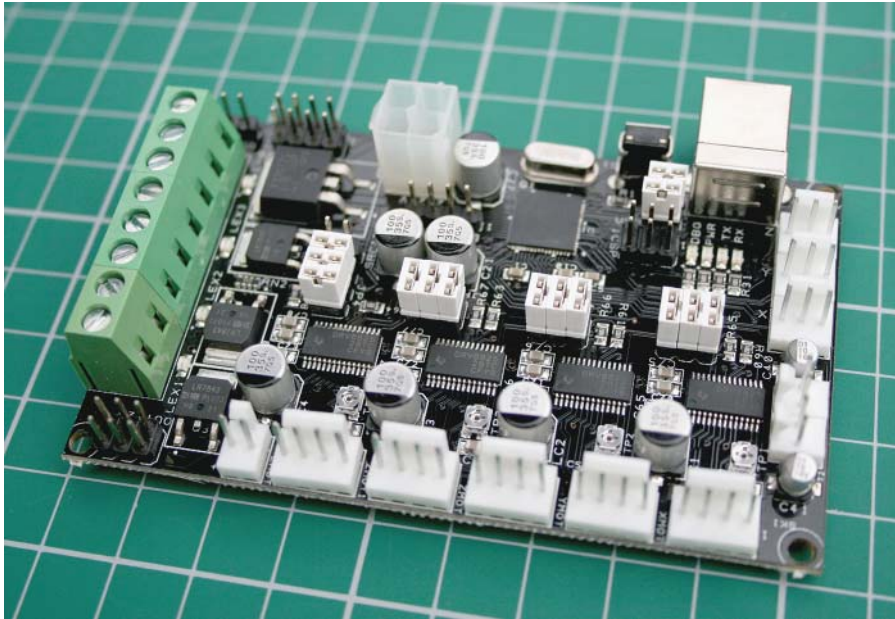


Abbildung 13.4: Minitronics enthält nur die für den Betrieb eines 3D-Druckers absolut erforderliche Elektronik.

### Elefu-RA V3

Das Elektronik-Set Elefu richtet sich sowohl an den Entwickler (weil es zahlreiche Erweiterungen und Flexibilität bietet), als auch an den Neuling. Das für dieses Board erforderliche Netzteil nutzt die ATX-Einheit jedes Standard-PCs. Schließen Sie einfach Ihr ATX an das Board an. Alle anderen Anschlüsse erfolgen über standardmäßige Schraubklemmen, die alle deutlich beschriftet sind. Damit wird die Verdrahtung der Maschine ganz einfach und es sind keine Quetschverbinder oder Lötarbeiten notwendig.

Zu den Erweiterungsmodulen gehören ein LCD-Board mit Speicherkarte und Drehknopf für die Navigation innerhalb der Programmeinstellungen und Druckdateien, sodass für das Drucken kein Computer erforderlich ist. Diese Erweiterungsplatinen werden ebenfalls einfach mithilfe von Schraubklemmen verdrahtet. Mit dem Elefu-Design ist es übersichtlich und einfach, einen 3D-Drucker zu verdrahten – und es gibt zahlreiche Erweiterungsoptionen, unter anderem für drei separate Extruder. Außerdem verwendet es modulare Motortreiber, so wie RUMBA und RAMPS (siehe Abbildung 13.6).

### Megatronics

Megatronics ist eine weitere integrierte Hauptplatine, die ideal für zukünftige Erweiterungen geeignet ist. Sie unterstützt drei Extruderoptionen und ist hervorragend für Entwickler (und





Abbildung 13.5: RUMBA mit einem Erweiterungsadapter für eine Speicherkarte, um den G-Code des Modells zu speichern – druckbereit

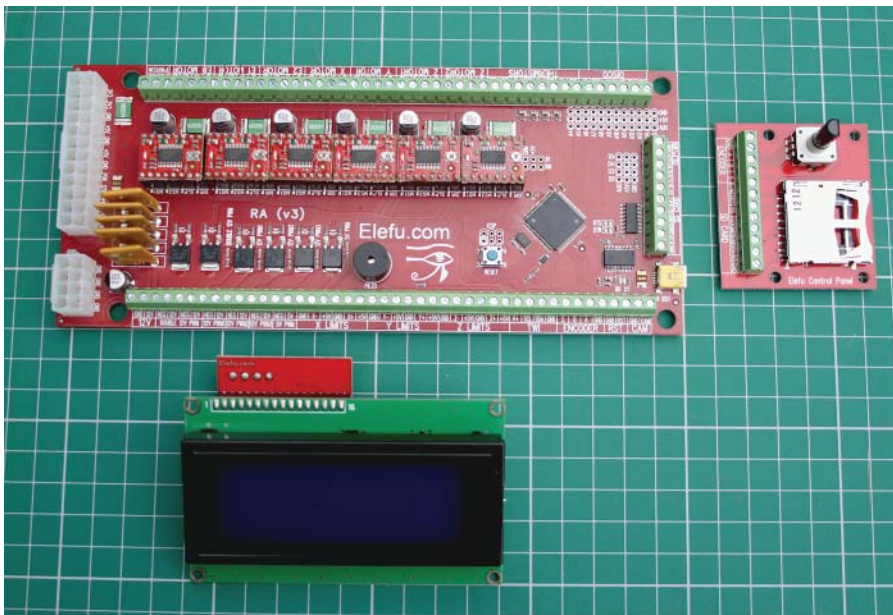


Abbildung 13.6: Das Elefu-Design

andere) geeignet, die eine Maschine mit allen Optionen bauen wollen. LCDs und Tastaturen können angeschlossen werden, und der Speicherkartensteckplatz ist standardmäßig enthalten (siehe Abbildung 13.7).

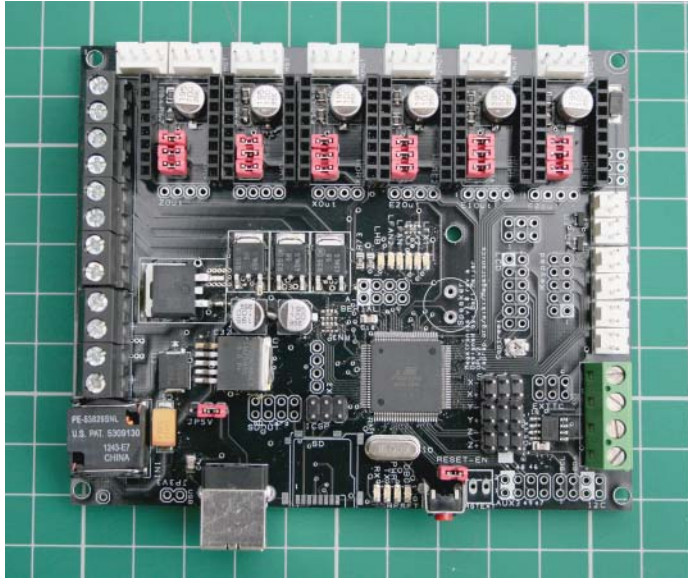


Abbildung 13.7: Die integrierte Hauptplatine Megatronics

Megatronics ist der größere Bruder der Minitronics. Sie bietet vergleichbare Funktionen wie RUMBA, verwendet modulare Schrittmotortreiber und kann mit zwei Thermoelement-Temperatursensoren betrieben werden – was alles zum Standard gehört. Alle anderen Elektronikpakete gestatten nur eine Thermistor-Abtastung. Das ist für die meisten Benutzer ausreichend, aber Thermoelemente unterstützen sehr viel höhere Drucktemperaturen (über 300 Grad Celsius), sodass exotischere Materialien verarbeitet werden können. Thermoelemente bieten außerdem eine sehr viel präzisere Temperaturmessung und sind mit Hochtemperaturkabel vorverdrahtet.

## Elektronik für Ihren RepRap-3D-Drucker

In Kapitel 12 haben wir einen Rahmen montiert. Jetzt können wir unserem Konstruktionsbeispiel Prusa i3 die elektrischen Komponenten hinzufügen. Die Motoren haben wir bereits eingebaut, deshalb konzentriert sich dieser Abschnitt auf die Sensoren, Heizelemente und die Hauptplatine für die Elektronik. Die folgenden Abschnitte beschreiben diese Baugruppen genauer.

## Montagevorbereitung für die Elektronik

Wir unterteilen die Montage der Druckerelektronik in fünf allgemeine Phasen:

1. Anbau der Positionssensoren an den Rahmen.
2. Anbringung des Heizbetts auf dem Y-Wagen.
3. Vorbereitung und Montage der Elektronik-Hauptplatine.
4. Vorbereitung des Netzteils und Anschluss an die Elektronik.
5. Anschluss der Verdrahtung für Motor und Positionssensoren an die Elektronik.

Die nächsten Abschnitte beschreiben diese allgemeinen Schritte genauer. Außerdem ist es sehr wahrscheinlich, dass die Komponenten Ihres Elektronikbausatzes vorverdrahtet sind. An den Motoren sollten Vierfachanschlüsse angebracht sein. Die Positionssensoren haben Dreifachanschlüsse.

Tabelle 13.1 zeigt eine allgemeine Liste der erforderlichen Teile für die Montage dieser Anschlüsse (falls Ihre Kabel noch nicht mit Steckern ausgestattet sind). Beispiele dafür sehen Sie in Abbildung 13.5.

Teil	Details	Menge
Mikroschalter-Baugruppe	An jeder Achse (X, Y und Z) des Druckers ist an der Home-Position (0, 0, 0) ein Sensor angebracht.	3
Molex 0,1" 3-fach-Quetschverbinder	Bringen Sie diese an, falls die Kabelenden der Mikroschalter-Baugruppe noch nicht damit ausgestattet sind.	3
Quetschstifte	Quetschen Sie diese Stifte auf die Kabel und führen Sie sie in den Anschluss ein.	9
Kabelbinder	Mit Kabelbindern sichern Sie die Positionssensoren an den Gleitstangen jeder Achse.	3
Kleine Schrauben	Wenn Sie einen Positionssensor an einer Platine anbringen, brauchen Sie möglicherweise Schrauben; überprüfen Sie Ihren Bausatz auf weitere Details.	6

*Tabelle 13.1: Für den Betrieb der Positionssensoren erforderliche Teile*

## Anbringung der Positionssensoren an dem Rahmen

Jetzt bringen wir die Positionssensoren an. Die in unserem Konstruktionsbeispiel verwendeten Mikroschalter sind vergleichbar mit dem in Abbildung 12.20 gezeigten Modell. Ihr Bausatz

enthält möglicherweise einen optischen oder magnetischen Positionssensor, wie in Abbildung 12.21 gezeigt. Alle diese Komponenten erfüllen dieselbe Funktion. Abbildung 13.10 zeigt Beispiele für Positionssensoren.

**1. Wenn die Kabel nicht mit Steckern ausgestattet sind, quetschen Sie Stifte an die einzelnen Kabel und setzen diese in 3-fach-Gehäuse ein.**

Sie können zwei oder drei Anschlüsse haben. Rot ist normalerweise das +5 V-Stromkabel, schwarz ist der Erdungsanschluss und weiß ist die Signalleitung. Überprüfen Sie die Position der Endschalter für die Elektronik, bevor Sie die Steckergehäuse anschließen. Richten Sie sich nach Abbildung 13.15.

**2. Für unser Konstruktionsbeispiel verwenden wir kleine Mikroschalter. Setzen Sie einen Kabelbinder in die beiden Löcher jedes Schalters ein.**

Ein Positionssensor kann ein einfacher verdrahteter Schalter sein oder in eine kleine Platine eingebaut sein. Die Montage kann also entweder über einen Kabelbinder erfolgen oder als Verschraubung an einem der gedruckten Kunststoffteile.

**3. Bringen Sie den Schalter an der vertikalen Gleitstange der Z-Achse links an der Maschine an. Ziehen Sie den Kabelbinder fest und schneiden Sie die überschüssige Länge ab.**

Das Ganze soll zum einen fest sitzen, muss aber auch ein Verschieben des Schalters nach oben oder unten erlauben, um ihn an der richtigen Höhe anzubringen, damit die Home-Position der Druckdüse oberhalb des Druckbetts sitzt. Wenn die Z-Achse nach unten gefahren wird, berührt sie den Schalter und aktiviert die Elektronik, damit an der eingestellten Distanz angehalten wird.

**4. Bringen Sie auf genau dieselbe Weise einen weiteren Schalter für den X-Wagen an einer der vertikalen 8-mm-Gleitstangen an.**

**5. Bringen Sie auf genau dieselbe Weise einen weiteren Schalter für den Y-Wagen an einer der horizontalen 8-mm-Gleitstangen an, jetzt aber ganz hinten an der Maschine.**

Wenn sich das Bett zurück an die Home-Position bewegt, berührt es diesen Schalter und hält an.

### *Anbringung des Heizbetts auf dem Y-Wagen*

Jetzt bereiten wir die Anbringung des Heizbetts an der per Laser ausgeschnittenen Y-Achse vor. Tabelle 13.2 listet die für dieses Verfahren erforderlichen Teile auf.

Nachdem Sie alle Teile für die Montage beschafft haben, gehen Sie wie folgt vor:

**1. Richten Sie die Platine (PCB) für Ihr Heizbett so aus, dass sich die elektrischen Anschlüsse an der Vorderseite der Maschine befinden und die Drähte unter der PCB durchgeführt sind.**

Teil	Details	Menge
Platine für das Heizbett	Sehr gebräuchlich ist das Modell MK2a, vorverdrahtet und mit einer LCD-Anzeige ausgestattet.	1
Verdrahteter Thermistor	100 k-Thermistor, vorverdrahtet	1
Kapton-Band	Hochtemperaturband aus Kapton oder PET für die Befestigung des Thermistors an der Platine für das Heizbett.	100 mm × 20 mm Band
M3-Muttern	Diese M3-Muttern sollten möglichst aus Edelstahl sein.	4
Isolationsmaterial	Es stehen verschiedene Optionen zur Verfügung.	1
Glas-Druckfläche	Eine Standard-Glaskachel, 200 mm x 200 mm groß, 4 mm stark	1

Tabelle 13.2: Teile für die Montage des Heizbetts

2. Drehen Sie das Bett um, sodass die Drähte vor Ihnen liegen und vertikal in Bezug auf die Platine.
3. Bringen Sie den Thermistor-Kopf in der Mitte des MK3-Heizbetts an. Sie sehen eine kleine Vertiefung, in die Sie ihn einsetzen können.
4. Bringen Sie den Thermistor-Kopf in einer Ebene mit der oberen Fläche des Heizbetts an.
5. Biegen Sie die Drähte auf die Unterseite des gedruckten X-Wagens auf die drei Linearlager, die an den Gleitstangen der horizontalen X-Achse angebracht sind.
6. Kleben Sie die Drähte des Thermistors mit dem Hochtemperatur-Kapton-Band fest. Überkleben Sie außerdem das Loch, in dem der Thermistor-Kopf sitzt.
7. Biegen Sie die Hauptstromkabel auf das Bett, sodass sie von Ihnen weg zeigen.
8. Kleben Sie die Heizdrähte und die Thermistordrähte zusammen, sodass sie einen Kabelstrang bilden, der zur Rückseite der Maschine hin zeigt.



Jetzt können Sie optional Isolationsmaterial an der Unterseite der Heizplatine anbringen. Das ist sinnvoll, weil sich das Bett dadurch schneller aufheizt und außerdem weniger Wärme und Leistung verlorengehen. Das dafür erforderliche Material sollte in Ihrem Bausatz enthalten sein. Dabei kann es sich um Kork, mit Metall überzogenen Karton, Glasfaser oder eine Folienisolierung handeln. Normalerweise wird die Isolierung mit Kapton-Band angebracht und dient gleichzeitig dazu, die Kabel von der Platine wegzuhalten.

9. Drehen Sie die Platine für das Heizbett um, sodass sich die LED an der Vorderseite befindet und die Drähte hinten an der Unterseite.



### 10. Bringen Sie das Heizbett an den zuvor montierten 20 mm großen M3-Halterungen der Y-Achse an.

Die bereits an den Halterungen angebrachte M3-Mutter hält das Heizbett jetzt in einem vorgegebenen Abstand von der Y-Achse. Wir können vier weitere M3-Muttern anbringen, um das Heizbett zu befestigen. Durch die Bewegung dieser Mutter können wir die Position des Heizbetts in Bezug auf die Y-Achse ändern, sodass es an allen vier Ecken eben ist, einen bestimmten Abstand einhält und horizontal liegt.

Das Bett muss noch nicht nivelliert werden. Dies ist Teil der Kalibrierung, die später erfolgt, bevor die Maschine auf den Druck vorbereitet wird.

### Vorbereitung und Einbau der Hauptelektronik

Jetzt bereiten wir die RAMPS-Elektronik vor (siehe Abbildung 13.1) und montieren sie am Aluminiumrahmen des Druckers. Tabelle 13.3 listet die dafür erforderlichen Teile auf.

Nachdem Sie alle erforderlichen Teile beschafft haben, gehen Sie wie folgt vor:

1. Bringen Sie die M3-Schrauben in den vier Löchern der Arduino MEGA-Steuerkarte an.
2. Schieben Sie auf der Rückseite der Karte die vier Abstandshalter auf die Schrauben.

Jetzt können Sie sie an den vier Montagepunkten an der Rückseite des vertikalen Aluminiumrahmens anbringen. Diese M3-Gewindelöcher sind speziell für die Arduino MEGA-Karte vorgesehen. Sie kann nur in einer Ausrichtung angebracht werden.

3. Schrauben Sie die MEGA-Karte am Rahmen fest.

Sorgen Sie dafür, dass die Abstandshalter angebracht sind, um den Abstand zwischen Karte und Rahmen einzuhalten. Andernfalls erzeugt die Karte einen Kurzschluss am Metall.

Teil	Details	Menge
Arduino MEGA Elektronik-Steuerkarte	Modell 1280 oder 2560	1
RAMPS	Modellversion 1.3 oder höher; ein fertiges RAMPS-»Shield« für die Arduino-Karte	1
M3-Schrauben	M3 x 20 mm Schrauben	4
M3-Kunststoffabstandshalter	Diese ca. 10 mm langen Teile dienen dazu, die Elektronik in einem bestimmten Abstand zum Aluminiumrahmen zu halten.	4
Kabelbinder	Optional kann das RAMPS-Shield mit Kabelbindern an der Arduino MEGA gesichert werden.	4

Tabelle 13.3: Teile für den Einbau der Elektronik



#### 4. Bringen Sie Ihr RAMPS-Shield an den entsprechenden Kontakten der Arduino MEGA-Karte an.

Die Kontakte können nur in einer Richtung eingesetzt werden. Bevor Sie diese Teile zusammendrücken, überprüfen Sie sorgfältig, ob keine der Kontakte verbogen sind.

#### 5. Richten Sie die Platine für das Heizbett so aus, dass sich die elektrischen Anschlüsse an der Vorderseite der Maschine befinden und die Drähte unter der Platine durchlaufen.

Damit haben Sie die Elektronik montiert und Sie können ein paar Kabelbinder um die Platinen herum anbringen, um sie fest zu verbinden.

### Vorbereitung des Netzteils und Anschluss an die Elektronik

Hier zeigen wir Ihnen Beispiele für Netzteile und Drahtdurchmesser, die Ihnen als Anhaltspunkt dienen sollen. Informieren Sie sich aber auch gründlich darüber, wie Ihr spezifisches Netzteil einzubauen ist. Tabelle 13.4 listet die erforderlichen Teile auf.



Alle Netzteile sind unterschiedlich, lesen Sie also die Anleitung für Ihren Bausatz sorgfältig durch.

Jetzt geht es um die allgemeinen Anschlüsse, die Sie an der RAMPS-Elektronik vornehmen müssen. Abbildung 13.12 zeigt ein Beispiel für das Netzteil, das wir in unserer Beispielkonstruktion verwenden. Abbildung 13.16 zeigt typische Drähte für 3D-Drucker. Wenn Sie den Kabelbaum mit Ihrem Netzteil verbinden müssen, dann machen Sie das jetzt. Dazu gehen Sie ganz allgemein wie folgt vor:

#### 1. Überprüfen Sie die Anschlüsse und die Leistungsauslegung Ihres Netzteils.

Teil	Details	Menge
+12 V DC Netzteil	Für eine Maschine mit Heizbett brauchen Sie normalerweise ein Gleichstrom-Netzteil mit 200 W (oder höher), das mit +12 V betrieben wird.	1
Kabelbaum	Ein vorgefertigter 4-fach-Kabelbaum für 11 A und höher für den Anschluss an RAMPS	1
Aderendhülsen	Für den Anschluss der Netzteilkabel an die Schraubklemmeneingänge des RAMPS	4
Montageschrauben oder Kabelbinder	Das Netzteil wird in der Regel extern am 3D-Drucker angebracht, aber Sie sollten die Kabel mithilfe von Kabelbindern ordentlich befestigen.	Nach Bedarf

Tabelle 13.4: Teile für die Montage des Netzteils

Aus Ihrem Netzteil sollten zwei positive und zwei Erdungsanschlüsse kommen. Die Anschlüsse aus Ihrem Netzteil sollten 11A+ für den Anschluss des Heizbetts und 5A+ für den Motor und andere Komponenten bieten.

## 2. Überprüfen Sie die vier RAMPS-Schraubklemmenanschlüsse für den Stromeingang.

Diese Anschlüsse sind beschriftet: Zwei sind positiv, zwei sind negativ (GND). Die Schraubklemme unten links an der RAMPS-Platine am Stromeingang ist ein Erdungsanschluss (GND), normalerweise ein schwarzer Draht vom Netzteil.

## 3. Bringen Sie Ihren GND-Draht in der entsprechenden Schraubklemme an.



Sie sollten immer Aderendhülsen an Drähten anbringen, die in eine Schraubklemme eingesetzt werden – bevor Sie sie festziehen.

## 4. Schließen Sie das 5A+-Netzteil für die Motoren und andere Komponenten der RAMPS- und der Arduino-Karte an.

Wenn Ihr Netzteil Kabel unterschiedlicher Größen aufweist, schließen Sie hier das dünnere Kabel an.

## 5. Schließen Sie die GND-Verbindung für das Heizbett an.

## 6. Schließen Sie die 11A+-Verbindung für das Heizbett an.



Sorgen Sie dafür, dass diese Verbindung ordentlich verschraubt ist. Dies ist der letzte Anschluss und er sorgt für die meiste Leistung, die von der RAMPS-Karte benötigt wird.

## 7. Befestigen Sie alles ordentlich mit Kabelbindern nach Bedarf.

### *Anschließen des Motors und der Verdrahtung für die Positionssensoren an die Elektronik*

Neil Underwood hat in der RepRap-Wiki ein sehr übersichtliches Diagramm zur Verdrahtung der RAMPS-Steuerkarte bereitgestellt:

<http://reprap.org/mediawiki/images/6/6d/Rampswire14.svg>

Jetzt haben wir verschiedene Komponenten – alle mit Anschlüssen – an unseren 3D-Drucker angebaut. In diesem Abschnitt schließen wir diese Teile an unsere RAMPS-Steuerkarte an. Dazu gehen Sie wie folgt vor:

## 1. Schließen Sie die zwei Z-Achsen-Motoren an, die die vertikale Achse antreiben.

Beide Motoren werden an denselben Schrittmotorantrieb-Z-Anschluss der RAMPS-Karte angeschlossen. Sie sehen zweimal vier Kontakte neben dem Z-Achsen-Schrittmotorantrieb.

Alle Motoranschlüsse sind beschriftet, als 2B, 2A, 1A und 1B, abhängig von dem Typ Ihres Schrittmotors und seiner internen Verdrahtung. Möglicherweise müssen Sie einen der vierpoligen Anschlüsse umgekehrt anbringen. Motoren werden üblicherweise mit roten, blauen, grünen und schwarzen Kabeln verdrahtet.



Wenn Sie den vierpoligen Anschluss verkehrt herum anschließen, kehren Sie die Drehrichtung des Motors um. Diese Umkehrung können Sie auch in der Software nachvollziehen. Wenn Sie also Stecker mit Verriegelungslaschen haben, machen Sie sich keine Gedanken – wir können die Richtung später umkehren, wenn wir die Firmware für die Maschine einrichten.

2. **Schließen Sie die X- und Y-Motoren an die vierpoligen Motoranschlüsse an, die auf der RAMPS-Karte gekennzeichnet sind.**
3. **Schließen Sie das Heizbett an den Thermistorsensor (Temperatur) an, ebenso wie an das Heizelement (in der Regel mit den dicken Drähten).**
  - a. Schließen Sie die zweipoligen Thermistordrähte an den T1-Anschluss an der RAMPS-Karte an. Die Drähte können beliebig angeordnet werden.
  - b. Schließen Sie die Stromanschlüsse des Heizbetts an den D0A-Anschüssen der RAMPS-Karte an. Verwenden Sie dazu unbedingt Aderendhülsen.
4. **Bringen Sie die drei Endschalter an der RAMPS-Karte an.**

Diese sind auf der RAMPS-Karte deutlich beschriftet. Sie haben sechs Anschlüsse – als MIN und MAX gekennzeichnet – für den Anschluss von Home-Position-Sensoren und Gesamtwegsensoren.



Bei fast allen 3D-Druckern sollten Sie die MAX-Endschalteranschlüsse *nicht* anbringen. Sie können in der Firmware angeben, wie weit sich die Maschine maximal bewegen kann. In den hier gezeigten Schritten bringen wir nur die MIN-Endschalter an. Sie müssen in der richtigen Ausrichtung angeschlossen werden, lesen Sie also in Ihrer Installationsanleitung nach. Wahrscheinlich haben Sie einen roten und einen weißen Draht: rot für 5V+ und weiß für die Signalverbindung.

5. **Befestigen Sie alles ordentlich mit Kabelbindern nach Bedarf.**
6. **Bereiten Sie die Installation der Antriebsmodule für den Schrittmotor an der RAMPS-Karte vor (siehe Abbildung 13.9).**

Überprüfen Sie sorgfältig, ob der Schrittmotortreiber ordnungsgemäß ausgerichtet ist. Die Schrittmotormodule werden an die Stiftheuten an der RAMPS-Karte angeschlossen.



Überprüfen Sie unbedingt, dass Kontakt 1 an jedem Modul mit Kontakt 1 am RAMPS-Anschluss angeschlossen wird.

## Modulare Komponenten, Sensoren und Motoren

In den vorigen Abschnitten haben wir einen Großteil der für einen 3D-Drucker benötigten Elektronik installiert und verdrahtet. Die folgenden Abschnitte erklären diese Komponenten Ihres 3D-Druckers, ebenso wie einige gebräuchliche Sensoren, Optionen, Verdrahtungen und andere Erweiterungen, die Sie für Ihren 3D-Drucker möglicherweise brauchen. Beispielsweise können Sie RAMPS eine Schnittstelle zu einem LCD-Bildschirm und einer Speicherkarte hinzufügen, sodass Ihr Drucker auch funktioniert, wenn er nicht an einen Computer angeschlossen ist.

Anschließend geht es um die Firmware für private RepRap-3D-Drucker und die Konfiguration unserer Beispielkonstruktion Prusa i3.

### Drucken ohne Computer

Beliebte Add-ons für einen 3D-Drucker sind unter anderem ein LCD-Bildschirm, eine Speicherkarte und ein Drehknopf. Diese Schnittstellen werden auf einer separaten »Display«-Steuerungskarte bereitgestellt (siehe Abbildung 13.8). Diese Optionen ermöglichen ein eigenständiges Drucken, ohne dass ein Computer dafür benötigt wird. Ein LCD-Bildschirm gestattet die Einrichtung, das Vorheizen und den Ausdruck von einer auf der Speicherkarte gespeicherten Datei – ohne dass der Drucker an einen Computer angeschlossen sein muss. Diese Anordnung ist praktisch für 3D-Drucker, die mehrere Stunden (oder sogar Tage) drucken, oder wenn Sie aus irgendeinem anderen Grund nicht wollen, dass Ihr Computer die ganze Zeit über läuft. Beachten Sie, dass die Speicherkarte mehrere Dateien enthalten kann, die später gedruckt werden sollen. Diese Dateien können auch gelöscht werden, und die G-Code-Dateien können auf Ihrem Computer gespeichert und später für den 3D-Druck geladen werden.

### Motor-Antriebsmodule

Die Bewegung bei einem RepRap-3D-Drucker wird durch *Schrittmotoren* realisiert. Ein solcher Elektromotor benötigt einen speziellen Treiber, der den Motor vorwärts oder rückwärts laufen lässt. Jeder »Schritt« dreht den Motor um eine winzige Strecke. Unsere Elektronik und die Firmware erzeugen Tausende von Impulsen, damit die Schrittmotortreiber den Motor über eine präzise Distanz bewegen, abhängig vom Antriebsritzel und von der Schrittweite.

Ein Schrittmotorantriebsmodul (siehe Abbildung 13.9) kann vollständig integriert sein, oder aber (was häufiger der Fall ist) in die Elektroniksteuerkarte eingesteckt werden. Jedes Modul treibt einen Schrittmotor an, für einen 3D-Drucker benötigen Sie also mindestens vier solcher Module.

Der standardmäßige NEMA 17-Schrittmotor für RepRap-Drucker benötigt 200 Impulse, um eine vollständige Drehung auszuführen (360 Grad). Unsere Schrittmotortreiber verwenden jedoch das sogenannte *Microstepping*, wobei der Motor um einen Bruchteil dieser Distanz



Abbildung 13.8: Die reine »Display«-Karte (unten) und dieselbe Karte in einem 3D-gedruckten Gehäuse (oben)

bewegt wird. Durch das Microstepping erzeugt der Motor weniger Geräusche und er gestattet eine präzisere Positionierung des Extruders. Häufig wird ein Schrittmotortreiber in einem 8- oder 16-Microstep-Modus verwendet.

Der *Microstep-Modus* eines Schrittmotors wird häufig über kleine Jumper-Schalter eingestellt, die angebracht oder entfernt werden, um den Modus ein- oder auszuschalten. Weitere Informationen, wie diese Jumper gesetzt werden müssen, finden Sie in der Anleitung zu Ihrer Elektronik. Merken Sie sich unbedingt, welche Einstellung Sie verwenden (das brauchen Sie noch, wenn wir später in diesem Kapitel die Firmware konfigurieren).

Die meisten RepRap-Maschinen verwenden 16 Microsteps (16x): Die Elektronik und die Firmware müssen 3200 Impulse erzeugen, damit sich der Motor einmal um volle 360 Grad dreht. Sie erkennen sofort, dass diese feine Kontrolle eine höhere Positionsauflösung für einen 3D-Drucker erzeugt. Immer mehr Elektronik- und Treibermodule bieten auch die Option 32x an, wodurch die Motoren noch leiser werden und eine ultrafeine Auflösung entsteht.

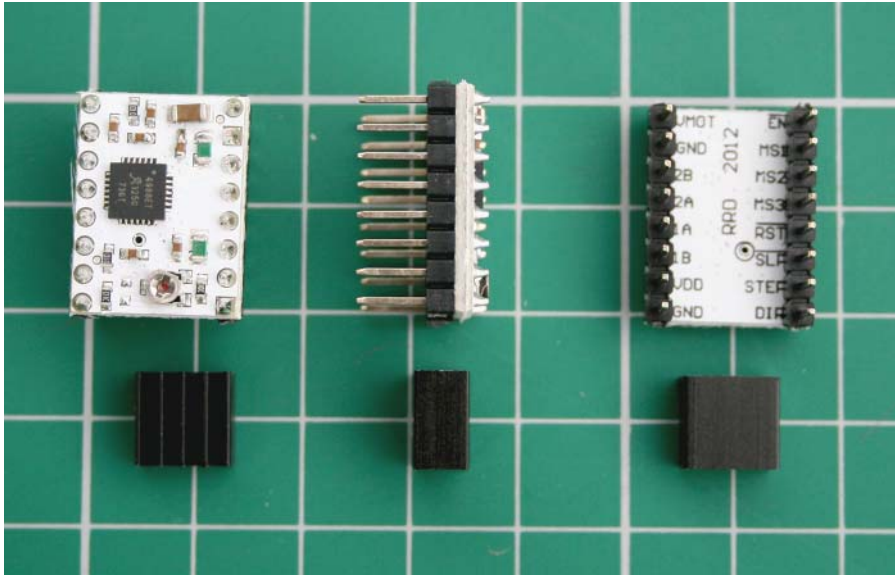


Abbildung 13.9: Antriebsmodul für einen Schrittmotor



Es gibt Obergrenzen für die maximale Schrittrate Ihrer Elektronik. Wenn so viele Schrittsequenzen ausgeführt werden müssen, kann dies eine zusätzliche Verarbeitungslast für die Firmware bedeuten, die die Positionsberechnungen ausführen muss. Diese zusätzliche Belastung kann einige mechanische Prozesse verlangsamen – beispielsweise eine rasche Beschleunigung des Extruders –, deshalb bevorzugen viele 3D-Drucker-Benutzer die Verwendung unterschiedlicher Motoren für unterschiedliche Zwecke:

- ✓ 16x für die X-, Y- und Z-Motoren (um höchste Auflösung und einen ruhigen Betrieb zu gewährleisten)
- ✓ 8x für den Extrudermotor (um ein schnelles Umkehren und beschleunigte Bewegungen zu ermöglichen)

Die daraus resultierende verstärkte Reaktionsgeschwindigkeit kann die Druckqualität erhöhen.

Häufig ist ein kleiner Aluminiumkühlkörper am Controller installiert, um die Betriebstemperatur zu reduzieren. Ohne einen Kühlkörper kann der Controller so heiß werden, dass sich der Benutzer daran verbrennt oder der Controller sich selbst zerstört. Sie können die dem Motor bereitgestellte Leistung festlegen (man spricht von *Strombegrenzung*), indem Sie mit einem Schraubendreher einen winzigen Drehknopf drehen (siehe unten links in Abbildung 13.9). Alle Schrittmotoren sollten eine Strombegrenzung haben, damit sie innerhalb der für sie vorgesehenen Wertebereiche arbeiten und nicht überhitzen oder durchbrennen (womit auch das Antriebsmodul für den Schrittmotor zerstört würde).





Entfernen Sie keinesfalls den Anschluss für einen Schrittmotor von der Elektronik, solange diese unter Spannung steht. Damit können Sie den Treiber für den Schrittmotor ganz leicht zerstören.

## Auswahl der Module für die Positionssensoren

Bei fast jedem 3D-Drucker muss die Elektronik wissen, wo sich die Home-Position befindet. Dazu wird jede Achse langsam in eine bekannte Richtung gefahren, bis ein Endschalter oder ein Sensor ausgelöst werden. Daran erkennt die Elektronik, dass Sie für jede Achse bei »0« angekommen sind. Wenn sich der Extruderwagen an der Home-Position befindet, können Sie mit dem Drucken beginnen, weil der Drucker weiß, wo die verschiedenen 3D-Bewegungen beginnen sollen, um den Druck anzufertigen.



3D-Drucker verwenden die interne *Home-Position* als allgemeinen Referenzpunkt. Von dem Moment an, ab dem die Home-Position definiert wurde, wird jede Bewegung als Anzahl von Schritten entlang jeder Achse berechnet, die den Druckkopf im 3D-Raum positionieren. Wenn eine Achse, ein Wagen oder ein Druckkopf verschoben werden oder sich die Ausrichtung gegenüber der Einstellung in der Elektronik ändert, druckt der 3D-Drucker weiter, aber das Modell wird falsch ausgerichtet und ist in der Regel unbrauchbar, weil der geschmolzene Kunststoff an den falschen Orten angebracht wird. So wie die 2D-Punktmatrixdrucker der Vergangenheit ahnungslos weiterdruckten, selbst wenn das Papier nicht mehr ordnungsgemäß ausgerichtet war, verhält es sich auch bei den 3D-Druckern. Und selbst die absoluten Profigeräte können bei einem Fehler in der Ausrichtung nicht erkennen, dass etwas schief läuft.

Damit der Druckauftrag nicht die Orientierung verliert, verwenden wir im Wesentlichen drei Positionssensoren:

- ✓ Der gebräuchlichste Sensor ist ein einfacher Mikroschalter (oben in Abbildung 13.10 gezeigt). Der Wagen drückt mechanisch auf den Schalter, der ein Signal sendet, um der Elektronik mitzuteilen, dass sich der Wagen an der Home-Position befindet.
- ✓ Ein optischer Sensor (wie in der Mitte in Abbildung 13.10 gezeigt) unterbricht einen Infrarot-Lichtstrahl und löst damit ein Signal für die Elektronik aus, dass der Wagen die Home-Position erreicht hat. Es handelt sich dabei um einen kontaktlosen Schalter, deshalb ist er zuverlässiger als ein mechanischer Mikroschalter.
- ✓ Die fortschrittlichste Form der Positionssensoren (siehe Abbildung 13.10 unten) ist der sogenannte *Hallsensor*, der ein Magnetfeld erkennt. Er funktioniert sehr präzise und reproduzierbar und ist ebenfalls kontaktlos. Sie brauchen nur einen winzigen Magneten am Wagen oder an der bewegten Achse anbringen und den Sensor an der Home-Position befestigen. Wenn der Magnet in eine bestimmte Distanz zu dieser Position gelangt, löst er das Home-Signal für die Elektronik aus. Hallsensoren besitzen einen kleinen Drehknopf, sodass Sie die genaue Auslösedistanz des Magneten für den Sensor einstellen können. Diese Art Sensor wird häufig an den vertikalen Z-Wägen verwendet, um die Position der

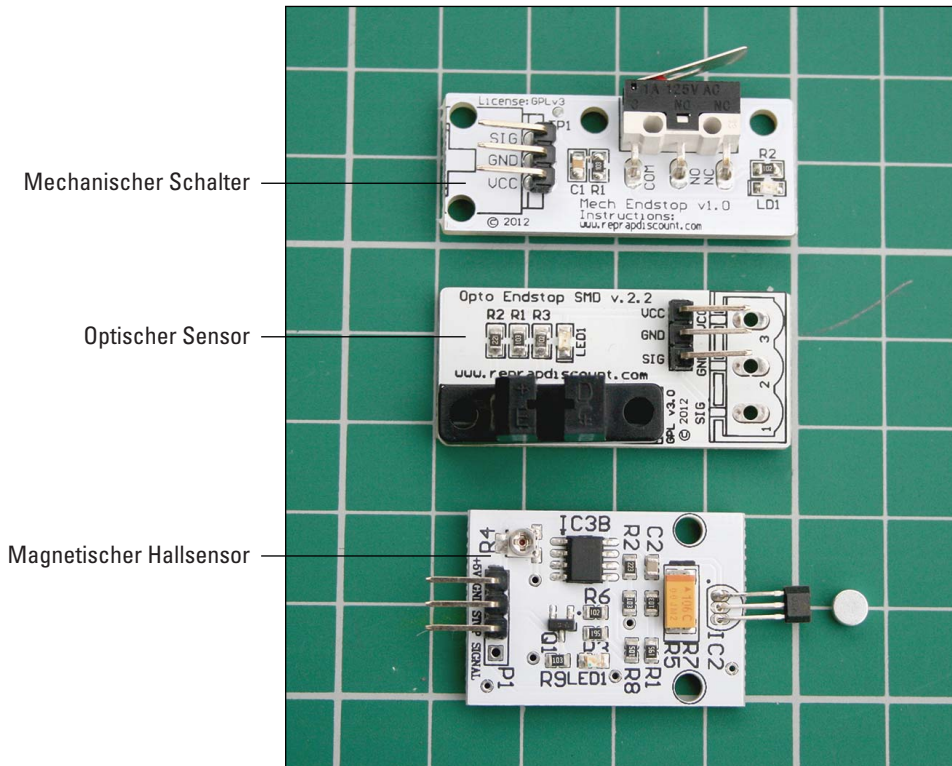


Abbildung 13.10: Positionssensoren legen die Home-Position für den Drucker fest.

Düse in einer präzisen Distanz zum Druckbett festzulegen, in der Regel mit einem Spalt, der nicht dicker als ein Blatt Papier ist.



Sie können einen beliebigen Positionssensor oder eine Kombination aus mehreren solchen Sensoren verwenden. Wir empfehlen Ihnen, einen einstellbaren Magnetsensor für die Ausrichtung des Z-Wagens zu verwenden.

## Die erforderliche Stromversorgung

Die Auswahl eines geeigneten Netzteils ist eine der wichtigsten Aufgaben beim Bau eines 3D-Druckers. Ein Großteil der RepRap-Elektronik wird über ein einziges Netzteil betrieben, in der Regel mit 12V DC, und erzeugt bei Bedarf andere Spannungen. Beim 3D-Druck muss Kunststoff geschmolzen werden, deshalb benötigen private 3D-Drucker häufig sehr viel Leistung, um die Motoren anzugreifen und (insbesondere) die Druckplatte zu beheizen. Das bringt einige Herausforderungen mit sich – vor allem muss ein Netzteil mit ausreichender Kapazität und Verdrahtung beschafft werden.



Ein Gerät, das an eine normale Steckdose angeschlossen wird, sollte mit äußerster Vorsicht behandelt werden. 3D-Drucker verwenden niedrigere Spannungen für den Betrieb der verschiedenen Komponenten, werden aber über das Netzteil mit üblichem Haushaltsstrom versorgt.

Wenn Sie beispielsweise ein 200 mm x 200 mm großes Heizbett betreiben wollen, hat dieses einen Widerstand von ca. 1,0 Ohm. Beim Betrieb mit einem Netzteil mit 12 Volt (V) zieht das Gerät 12 Ampere (A) Strom, also ca. 150 Watt (W) Leistung. Wenn das Bett aus dem kalten Zustand aufgeheizt wird, kann ein Spitzenwert von 20 A benötigt werden. Das ist eine hohe Last, selbst für Industriennetzeile.

Wenn Sie dann noch überlegen, dass für das Hot-End weitere 20 W für den Betrieb erforderlich sind – und vier oder fünf Motoren ebenfalls 20 W benötigen –, erkennen Sie sofort, dass Sie für den Betrieb der meisten 3D-Drucker mindestens 200 W bei 12 V benötigen. Eine kostengünstige (und unmittelbar erhältliche) Option ist das PC ATX-Netzteil, das häufig verwendet wird und in der Regel für einen hohen Stromausgang am +12-V-Netzteil ausgelegt ist.



Bringen Sie unbedingt in Erfahrung, wie viel Leistung bereitgestellt werden kann. Möglicherweise brauchen Sie ein 400-W-Netzteil (oder größer), um zu gewährleisten, dass ausreichend viel Leistung für die +12-V-Schiene zur Verfügung steht.

Die zuvor beschriebene Elefu-Elektronik erlaubt den direkten Anschluss eines ATX-Netzteils. Für die meisten anderen RepRap-Elektroniksysteme müssen mehrere der (gelben) +12-V-Ausgangsdrähte verbunden werden, um genug Leistung für den Betrieb bereitzustellen. Häufig hat man mehrere Leistungseingänge an der Elektronik und einen speziellen Anschluss für das Heizbett (siehe Abbildung 13.11). Es ist komplizierter, ein ATX-Netzteil für eine andere RepRap-Elektronik anzuschließen, aber dennoch ist ATX immer noch die gebräuchlichste Lösung für die Versorgung von privaten 3D-Druckern.

Eine weitere Möglichkeit ist ein industrielles Netzteil (siehe Abbildung 13.12). Ein solches industrielles Netzteil weist eine weniger komplizierte Verdrahtung für die meisten RepRap-Konfigurationen auf, die Kabelschuhe oder Flachstecker verwenden, allerdings muss der Benutzer auch einen direkten Anschluss an das Stromnetz vornehmen. Diese Netzteile werden häufig in großen Maschinen verwendet, sie haben zahlreiche spezielle Schraubklemmenausgänge, die direkt mit der RepRap-Steuerelektronik verdrahtet werden können. Sie können etwas teurer als ein ATX-Netzteil sein, aber sie sind genau für diesen Zweck ausgelegt. ATX-Netzteile sind für die Versorgung von Computer-Hauptplatinen mit vielen unterschiedlichen Spannungen vorgesehen.

Der Betrieb mit einer höheren Spannung ist möglich, was gewisse Vorteile für die Motorleistung und die Aufheizzeiten haben kann. Außerdem können damit dünnere Drähte vom Netzteil aus verwendet werden. Überprüfen Sie aber auch sorgfältig, ob Ihre Elektronik für Netzteile mit mehr als +12 V geeignet ist, und welche Einstellungen dafür erfolgen müssen.

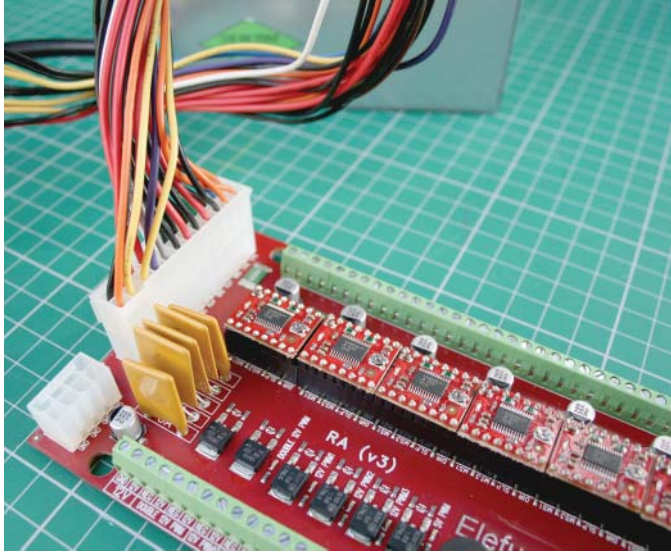


Abbildung 13.11: Ein ATX-Netzteil, angeschlossen an die Elefu-Elektronik

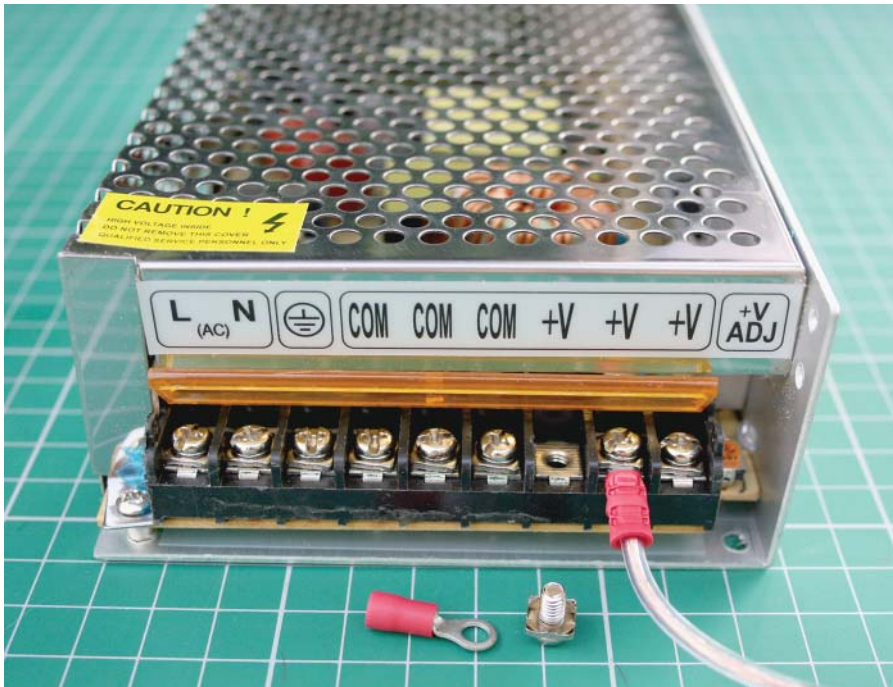


Abbildung 13.12: Ein Industrie-Netzteil





Abbildung 13.13: Leistungsinformationen auf dem Aufkleber eines Netzteils

Informationen über die Leistung finden Sie auf einem Aufkleber am Netzteil. In Abbildung 13.13 zeigt ein Aufkleber auf einem Industrie-Netzteil deutlich die Maximalwerte 12V und 20 A an. Im Gegensatz dazu ist ein ATX-Netzteil auf 550 W ausgelegt und hat zahlreiche Stromschienen (an denen wir größtenteils nicht interessiert sind), ebenso wie zwei unabhängige 12-V-Ausgänge, die je 14 A liefern. Um innerhalb der für die Stromauslegung unseres 3D-Druckers spezifizierten Grenzwerte zu bleiben, müssten wir also eine der 12-V-Schienen anschließen, um das Heizbett zu versorgen, und die andere 12-V-Schiene für die Versorgung der Steuerelektronik.



Wenn für einen 3D-Drucker kein Heizbett erforderlich ist, kann sein Strombedarf über ein einfaches 60-W-Netzteil bereitgestellt werden, wie man sie für viele Laptops verwendet.

## Lüfter und Beleuchtung

Viele private 3D-Drucker verwenden Lüfter. Sie helfen, kritische Teile kühl zu halten, wie beispielsweise den thermischen Isolator des Hot-Ends. Außerdem können sie beim Druckprozess helfen (siehe Abbildung 13.14).

Fast jede RepRap-Elektronik verfügt über spezielle Lüfterausgänge, die über den G-Code gesteuert werden können. Sie können aus- und eingeschaltet werden und ihre Drehzahl

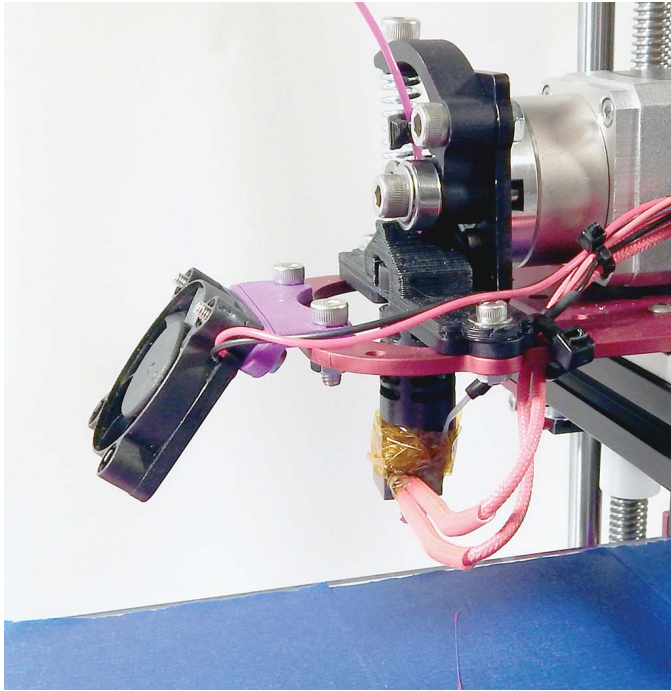


Abbildung 13.14: Ein kleiner Lüfter kühlt das gedruckte Teil.

kann geregelt werden. Bei der Einrichtung von Lüftern für die Kühlung von Teilen Ihres Extruders oder der gedruckten Teile müssen Sie darauf achten, das Heizbett oder das Hot-End des Extruders nicht zu stark zu kühlen. Damit verschwenden Sie Strom und es können die unterschiedlichsten Probleme entstehen – beispielsweise kann es sein, dass Teile nicht mehr am Druckbett haften, wenn die Temperatur zu schnell fällt, oder dass das heiße Ende verstopft, wenn es zu stark gekühlt wird.



Andere Lüfter können ständig betrieben werden, um die Elektronik – und manchmal auch das Netzteil – jederzeit kühl zu halten, solange der Drucker läuft.

Auch die Beleuchtung ist ein großer Renner bei privaten 3D-Druckern. Mithilfe einer gut ausgerichteten Beleuchtung, häufig weiße LED-Streifen oder Strahler, können Sie Düsen besser ausrichten, den Druckvorgang überwachen und dafür sorgen, dass der Kunststoff ordnungsgemäß an der Druckplatte haftet.

Die LED-Beleuchtung ist normalerweise direkt an das Netzteil angeschlossen, aber man findet immer mehr Elektroniksysteme, die spezielle Ausgänge für solche Optionen bereitstellen.



Die Anwender schließen viele andere Geräte an die Elektronik ihrer 3D-Drucker an und steuern diese. Ein ebenfalls interessantes und einfaches Add-on ist ein verdrahtetes oder per Infrarot übermitteltes externes Signal für eine Digitalkamera oder eine Videokamera. Sie können festlegen, dass die Kamera für jede Schicht Ihres 3D-Drucks ein Bild aufnimmt. Diese Bilder können später zu einem Zeitrafferfilm für Ihren Druck zusammengefasst werden.



Ein häufig verwendetes Signal, das auch über den G-Code gesteuert werden kann, ist die Ausgabe eines Tons zu Beginn und zum Ende eines 3D-Drucks.

Wenn sich Ihre 3D-Drucker in einem anderen Raum befinden (oder an anderer Stelle und außerhalb Ihres Blickfelds), können Sie auch eine Webcam einrichten, um ein Auge auf den Fortschritt werfen zu können und um sofort zu erkennen, wenn Probleme auftreten.

### Verdrahtung und Anschlüsse bei RepRap-Druckern

Selbst wenn Sie einen vollständigen RepRap-Bausatz haben, müssen Sie verschiedene Komponenten und Geräte an die Elektronik anschließen. Und manchmal müssen Sie dazu Stecker quetschen oder ein bisschen löten.

Einer der einfachsten Verbindungstypen ist eine *Schraubklemme*. Schraubklemmen werden häufig für Verbindungen mit hoher Leistung verwendet, wie beispielsweise für den Eingang des Netzteils, den Heizer des Hot-Ends und das Heizbett, sie können aber auch für Motoren, Lüfter und Beleuchtung genutzt werden.



Wenn Drähte in Schraubklemmen eingesetzt werden, sollten möglichst *Aderendhülsen* verwendet werden. Die Aderendhülse hilft, die Drähte zu festigen, sodass ihre Einzeldrähte beim Festziehen der Schraube nicht herausrutschen können. Aderendhülsen gewährleisten eine stabilere Verbindung und tragen dazu bei, ausgefranste Kabellitzen, Kurzschlüsse und durchgebrannte Anschlüsse zu vermeiden.

Ein weiterer gebräuchlicher Anschluss sind die *mehrpoligen Quetschkabelstecker*. Diese werden in einen Kunststoffmantel eingefügt und bilden einen Anschluss, der auf entsprechende Kontakte an der Elektronik aufgesteckt werden kann (siehe Abbildung 13.15). Sie sind häufig codiert, sodass sie nur in eine Richtung eingesetzt werden können. Andere verwenden Kunststoffhülsen, die gedreht oder versehentlich umgekehrt in den zugehörigen Anschluss eingesetzt werden können. Seien Sie vorsichtig, wenn Sie eine Verbindung vornehmen – achten Sie auf die richtige Ausrichtung.

Für die RepRap-Elektronik, Netzteile und andere Module können zahlreiche andere Stecker verwendet werden. Wenn Sie einen vollständigen RepRap-Bausatz kaufen, sind die Anschlüsse und die Verdrahtung häufig vorgefertigt. Wenden Sie sich an den Anbieter, wenn Sie Fragen zur Verdrahtung der Elektronik haben. Kleine Fehler können teure Teile Ihres neuen 3D-Druckers zerstören!

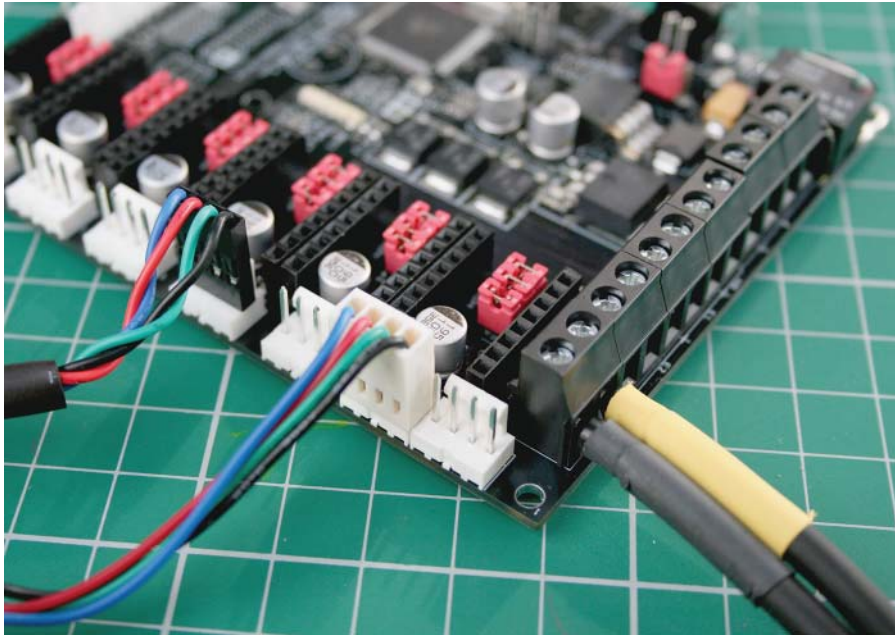


Abbildung 13.15: Gequetschte Motoranschlüsse und verschiedene Kunststoffstecker

Für einen sicheren und zuverlässigen Betrieb ist außerdem der korrekte Kabeldurchmesser von Bedeutung. Ein NEMA 17-Schrittmotor beispielsweise verwendet 7/02-Kabel: das heißt, sieben 0,2 mm dicke Litzen werden zu einem Kabel verdreht. Diese Drahtgröße ist in der Regel für den Anschluss von Sensoren, Lüftern und LED-Beleuchtungen geeignet. Anschlüsse an Hot-Ends, Heizbetten und Netzteilen benötigen wesentlich höher ausgelegte Kabel. Beispiele dafür sehen Sie in Abbildung 13.16.

## Firmware-Konfiguration

Wenn Ihre Firmware nicht auf die mechanische und elektrische Konfiguration Ihres 3D-Druckers eingestellt ist, können Sie damit überhaupt nichts drucken, so sehr Sie es auch versuchen.

Hier beschreiben wir, wie die Firmware für unsere Beispielkonstruktion, der Prusa i3-Maschine, eingerichtet wird. Dies ist ein wichtiger Schritt für jeden RepRap-3D-Drucker, aber Sie müssen ein wenig experimentieren, um ein optimales Ergebnis zu erzielen. Es gibt kein allgemeingültiges Verfahren für alle Maschinen.

Die Firmware eines RepRap-3D-Druckers ist relativ komplex, aber für unterschiedliche Druckertypen ausgelegt – und selbst für unterschiedliche Bewegungssysteme. Sie müssen die Konfiguration für den von Ihnen verwendeten Drucker unbedingt richtig einstellen. Man könnte ein ganzes Buch über die Firmware für RepRap-3D-Drucker schreiben, und es gibt

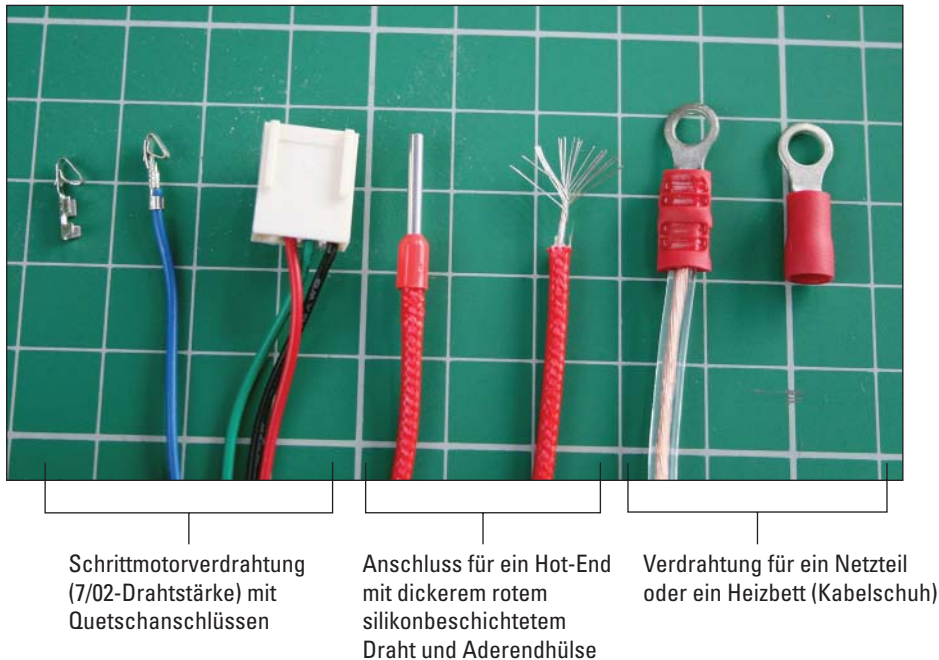


Abbildung 13.16: Übliche Verdrahtungen

zahlreiche Ressourcen für diesen Teil der Druckereinstellung, deshalb geben wir Ihnen in diesem Abschnitt nur ein paar wichtige Hinweise, was Sie bei der Kalibrierung Ihrer Maschine in der Firmware ändern sollten. Wenn Sie einen Bausatz gekauft haben oder eine der RepRap-»Standardmaschinen« bauen wollen, die wir in diesem Buch beschrieben haben, gibt es sehr wahrscheinlich irgendwo online eine Konfigurationsdatei, die Sie herunterladen können, oder eine Beschreibung für die Einstellungen, die Sie verwenden können.

Die Marlin-Firmware für RepRap ist nicht nur eine der gebräuchlichsten Firmwares, sondern auch einfach zu nutzen. Um die Änderungen zu kompilieren und die neue Firmware in Ihre Elektronik zu laden, müssen Sie die Arduino IDE (Integrated Development Environment) installieren. Heute wird häufig Version 023 verwendet, aber es gibt auch schon neuere Releases der Arduino IDE (als 1.0x bezeichnet), die für viele Versionen von Marlin verwendet werden können.



Früher oder später müssen Sie Einstellungen an Ihrem RepRap-3D-Drucker ändern, es ist also durchaus sinnvoll, sich die Arduino-Tools und die Sprache genauer anzusehen. Die Arduino-Software steht unter [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc) zum Download zur Verfügung. Eine Master-Version der Marlin-Firmware erhalten Sie vom leitenden Entwickler, Erik van der Zalm, auf der GitHub-Site <https://github.com/ErikZalm/Marlin> (siehe Abbildung 13.17).

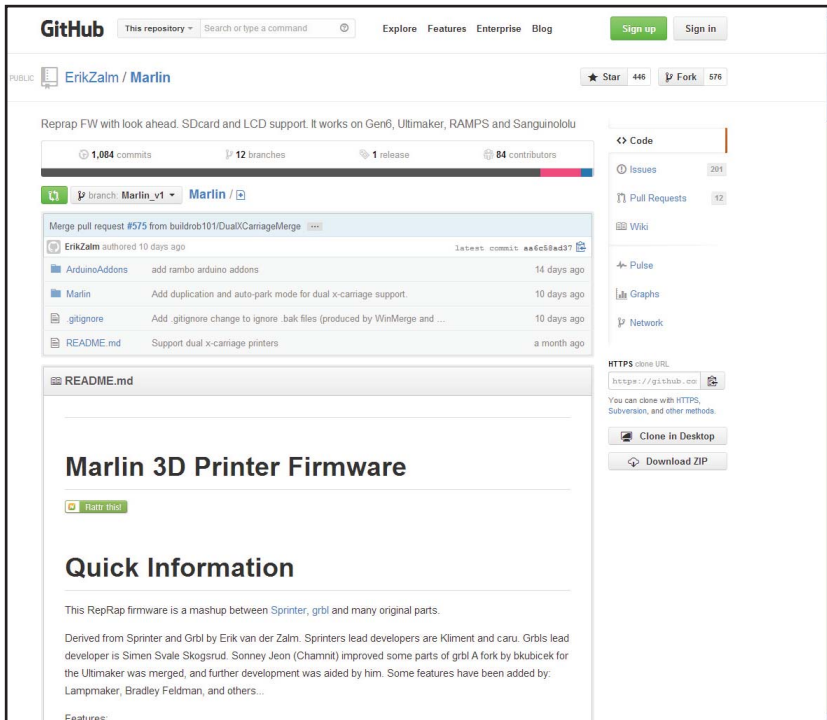


Abbildung 13.17: GitHub ist die wichtigste Quelle für die Marlin-Firmware, die auf RepRap-3D-Druckern verwendet wird.

## Firmware-Konfiguration für den Prusa i3

Hier finden Sie eine Kurzanleitung, wie Sie die Marlin-Firmware für Ihre RAMPS-Elektronik erhalten, ausgelegt auf unsere Beispielkonstruktion. Wir unterteilen den Prozess in vier einfache Schritte:

1. Download und Installation der Arduino IDE
2. Download und Extrahieren der Marlin-Firmware
3. Bearbeitung der Marlin-Firmware für RAMPS und Prusa i3
4. Hochladen der Marlin-Firmware an die RAMPS-Elektronik

In den nächsten Abschnitten werden diese Schritte genauer beschrieben.

Dieser Abschnitt beschreibt viele der Einstellungen, die Sie ändern können (und häufig auch ändern), um Ihren 3D-Drucker für die Verwendung der Marlin-Firmware einzurichten.

Weitere Informationen finden Sie auf [www.reprap.org](http://www.reprap.org). Die folgenden Schritte zeigen, wie wir unsere Prusa i3-Beispielmaschine einrichten. Nutzen Sie sie als allgemeine Richtlinie.

Um Ihre Firmware zu kompilieren und in Ihre Elektronik hochzuladen, brauchen Sie verschiedene Anwendungen und den Marlin-Firmware-Master von GitHub. Gehen Sie wie folgt vor:

**1. Laden Sie die Arduino IDE von [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc) herunter.**

Wir benötigen Version 0023. Führen Sie sie auf Ihrem Computer aus. Abhängig von dem von Ihnen verwendeten Betriebssystem installiert sie beim ersten Anschließen der RAMPS-Elektronik an Ihren Computer möglicherweise automatisch Treiber. Wenn dies nicht der Fall ist, gehen Sie wie in den Anleitungen auf dem Bildschirm gezeigt vor, um den Treiber zu installieren.

**2. Laden Sie die Marlin-Firmware von <https://github.com/ErikZalm/Marlin> herunter.**

Klicken Sie dazu einfach auf die Schaltfläche DOWNLOAD ZIP (Zip herunterladen) rechts am Bildschirmrand (siehe Abbildung 13.17).

**3. Nach dem Download extrahieren Sie den Inhalt der Zip-Datei.**

In der Zip-Datei finden Sie das Hauptverzeichnis der Marlin-Firmware.

**4. Bearbeiten Sie die Marlin-Firmware für RAMPS und Prusa i3.**

Die Hauptdatei, die Sie bearbeiten, ist `configuration.h`. Diese Datei enthält die meisten der wichtigsten Einstellungen für die mechanische Anordnung und den Elektroniktyp.

### ***Bearbeitung der Marlin-Datei `configuration.h`***

Die Bearbeitung dieser Datei ist der wichtigste Teil des Konfigurationsprozesses. Dieser Abschnitt bietet einen Überblick und spezifische Empfehlungen. Beachten Sie, dass es sich bei `configuration.h` um eine Textdatei in einer Programmiersprache handelt. Ändern Sie nichts an ihrem grundsätzlichen Aufbau und fügen Sie keine zusätzlichen Elemente ein, sonst können Sie sie nicht kompilieren und ausführen.

Im Code finden Sie viele hilfreiche Kommentare, die mit `//` beginnen. Alles nach dem Doppelslash ist ein Kommentar, den die Firmware ignoriert. Diese Kommentare sollen Ihnen helfen, Ihre Maschine zu konfigurieren. Außerdem können Sie sich durch den Eintrag von Kommentaren später vielleicht daran erinnern, warum Sie irgendwelche spezifischen Änderungen vorgenommen haben. Sie können dem Code weitere Kommentarzeilen hinzufügen, um festzuhalten, welche Teile Sie geändert haben und warum.

Beachten Sie, dass ein Teil des Codes auskommentiert wurde – indem einfach `//` davor geschrieben wurde. Sie müssen diese Zeilen möglicherweise wieder aktivieren und andere deaktivieren, wie im Kommentar beschrieben. Normalerweise ist das nur für nicht dem Standard entsprechende Einstellungen erforderlich, aber diese Möglichkeit kann abhängig von der von Ihnen für Ihren RepRap-Drucker verwendeten Elektronik extrem wichtig sein.

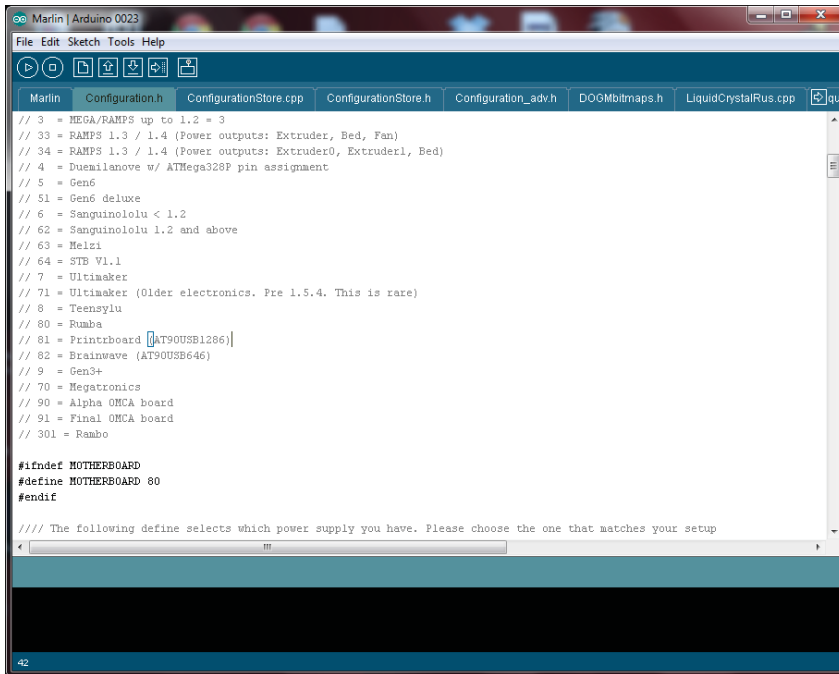


Abbildung 13.18: Anhand der Nummer der Elektronik erkennt die Firmware, welche anderen Einstellungen sie für die Konfigurationskonfiguration, Verdrahtung und vieles andere mehr verwenden soll

Eine weitere wichtige Einstellung in der Firmware ist ein `#define`-Wert, mit dem Sie Ihrer Firmware mitteilen können, welche Teile Ihrer Maschine aktiviert sind. Beispielsweise muss die Firmware wissen, ob Ihre Maschine mehrere Extruder und ein Heizbett verwendet.

Ganz oben in der Datei finden Sie eine Auswahl der Elektronik, die in RepRap-3D-Druckern verwendet wird. Hier sehen Sie eine lange Liste mit Kommentaren, die den verschiedenen Elektronikkomponenten jeweils eine eindeutige Nummer gibt. (Beispielsweise zeigt Abbildung 13.18 RAMBo als 301 und verschiedene RAMPS-Versionen als 3, 33 und 34 an.) Der Abschnitt, der dieser Liste folgt, zeigt ein `#define MOTHERBOARD 80` (siehe Abbildung 13.18), das heißt, diese Firmware ist für die RUMBA-Elektronik konfiguriert. Wenn wir die Firmware ändern wollen, sodass sie stattdessen für die RAMBo-Elektronik funktioniert, ändern wir die Einstellung mithilfe der Kommentare auf `#define MOTHERBOARD 301`.

Denselben Ansatz können Sie für die anderen Einstellungen anwenden. Lesen Sie die restliche `configuration.h`-Datei und führen Sie die erforderlichen Maßnahmen aus:

- ✓ Ändern Sie die `#define`-Nummern.
- ✓ Entfernen Sie die Auskommentierung für die Teile, die Sie aktivieren wollen.
- ✓ Kommentieren Sie die Teile aus, die Sie deaktivieren wollen.



Insbesondere müssen Sie die folgenden wichtigen Einstellungen überprüfen:

- ✓ **TEMP\_SENSOR:** Diese Einstellung hat üblicherweise mehrere Werte, angegeben als `_0` `_1` `_2`. Sie listet die Typen nach Nummern auf, die Sie aus den technischen Daten übernehmen. Der häufigste Typ ist 1 (EPCOS 100k). Sie müssen für den in Ihrem Hot-End verwendeten Typ unbedingt einen in dieser Liste aufgeführten Typ zuordnen und die Nummern aller aktiven Hot-Ends eingeben.
- ✓ **TEMP\_SENSOR\_BED:** Genau dasselbe wie die obige Einstellung. Normalerweise verwendet diese denselben Elektroniktyp wie Ihr Hot-End.
- ✓ **PID-Einstellungen:** Diese Einstellungen bestimmen den Proportional-Steuerkreis, der Ihr Hot-End ordnungsgemäß auf eine in Slic3r festgelegte Endtemperatur aufheizt. Die darunter erfolgten Einstellungen zeigen der Firmware an, wie Ihr Hot-End auf die Temperaturaufheizung und die Feststellung einer Änderung reagiert. Es ist sehr wichtig, dass Sie diesen Wert korrekt einstellen. Wir werden später in diesem Kapitel beschreiben, woher Sie diese Information erhalten, weil wir noch das Hot-End auf Temperatur kommen lassen und eine Testsequenz für ihre Berechnung ausführen müssen.

Sie müssen die folgenden Einstellungen ändern:

- **DEFAULT\_Kp** (das Proportionalelement)
- **DEFAULT\_Ki** (das Integralelement)
- **DEFAULT\_Kd** (das Differentialelement)



Diese Einstellungen hören sich alle sehr kompliziert an, aber machen Sie sich keine Gedanken. Wir werden einen Weg zeigen, wie uns die Elektronik die Informationen automatisch bereitstellt. Wir brauchen nur die Zahlen einzugeben, die die Firmware des RepRap-Druckers aus einer Nummer der Testheiz- und Kühlzyklen für das Hot-End der Maschine berechnet.

### Schalter

Der 3D-Drucker hat Schalter, anhand derer die Elektronik erkennt, wann sich die X-, Y- und Z-Wägen an der Home-Position befinden. Sie brauchen sehr häufig ein invertiertes Signal für die Elektronik, damit diese weiß, dass sie aktiviert werden. Wenn sich Ihre neue RepRap-Maschine weigert, sich nach der Einrichtung zu bewegen, dann müssen Sie wahrscheinlich die folgenden Einstellungen auf `true` oder `false` ändern:

- ✓ **X\_ENDSTOP\_INVERTING** = `true` (oder auf `false` ändern)
- ✓ **Y\_ENDSTOP\_INVERTING** = `true` (oder auf `false` ändern)
- ✓ **Z\_ENDSTOP\_INVERTING** = `true` (oder auf `false` ändern)

Analog müssen Sie für die Motorrichtungen vorgehen, wenn sich der Wagen von Ihrem Endschalter wegbewegt, wenn Sie die Maschine in Home-Position bringen wollen. Die

Motorrichtung wird mit einer der folgenden Einstellungen geändert. Dasselbe machen Sie mit dem Extruder, wenn er den Faden in die falsche Richtung drückt, wenn Sie ihn vorwärts bewegen. Und das machen Sie hier:

- ✓ `INVERT_X_DIR = true` (oder auf `false` ändern)
- ✓ `INVERT_Y_DIR = true` (oder auf `false` ändern)
- ✓ `INVERT_Z_DIR = true` (oder auf `false` ändern)
- ✓ `INVERT_E0_DIR = true` (oder auf `false` ändern)
- ✓ `INVERT_E1_DIR = true` (oder auf `false` ändern)
- ✓ `INVERT_E2_DIR = true` (oder auf `false` ändern)

Mit `X_MAX_POS` und allen anderen Achsen können Sie einen maximalen Bewegungspfad festlegen. Das ist praktisch, falls irgendetwas schief läuft oder Sie versehentlich versuchen, ein Objekt zu drucken, das größer als Ihre Plattform ist. Die Firmware stoppt die Achse, statt sie in das Ende der Maschine krachen zu lassen. Die Einstellungen für die Bewegung erfolgen wie folgt:

- ✓ Die Einstellung `HOMING_FEEDRATE` gibt an, wie schnell sich die X-, Y- und Z-Achsen bei Ausführung des `home`-Befehls bewegen. Wenn sie sich zu schnell bewegen, springen die Motoren und die Maschine wird falsch ausgerichtet.
- ✓ `DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT` gibt eine Zahlenfolge an, zum Beispiel `{55.5, 55.5, 500, 200}`. Diese Zahlenfolge bezieht sich auf die X-, Y- und Z-Achsen und auf alle an den Drucker angeschlossenen Extruder.

Diese Zahlenfolge muss unbedingt korrekt eingetragen werden. Daran erkennt die Firmware genau, wie viele Schritte ein Schrittmotor die Achse oder den Faden bewegen muss, damit eine Bewegung um genau 1 mm erfolgt. Wenn diese Einstellung nicht korrekt ist, erzeugt Ihre Maschine keine präzisen Teile und gibt zu viel oder zu wenig Material aus. Für den Anfang verwenden wir 200 für die Anzahl der Extruderschritte. Lesen Sie weiter, um zu erfahren, warum dies ein guter Ausgangswert ist – aber gehen Sie davon aus, dass Sie diese Zahl ändern müssen, nachdem Sie den Extruder kalibriert haben. Die Achsenbewegung wird anhand der von Ihnen montierten Riemen und Rollen bestimmt. Weitere Informationen entnehmen Sie den technischen Daten Ihres Bausatzes.

- ✓ `DEFAULT_MAX_FEEDRATE` ist die maximale Geschwindigkeit, mit der sich Ihr 3D-Drucker sicher bewegen kann, während er ohne Sprünge oder Motorstillstände drucken kann. Ein Beispiel für die Einstellung für X, Y, Z und Extruder ist `{300, 300, 300, 25}`.
- ✓ `DEFAULT_MAX_ACCELERATION` definiert die schnellste Änderungsrate bei Bewegungen der Beschleunigung, des Drucks und der Verschiebung. Ein Beispiel für die Einstellung für X, Y, Z und Extruder ist `{500, 500, 500, 380}`.
- ✓ `DEFAULT_ACCELERATION` ist mit der zuvor beschriebenen Maximaleinstellung verknüpft. Dies ist die Anfangsgeschwindigkeit für die Beschleunigung. Wenn sie zu hoch gewählt

wird, haben die Schrittmotoren nicht genügend Zeit, um auf Tempo zu kommen, und sie bleiben stehen oder springen. Ein Beispielwert ist 300 für alle Motoren, außer für den des Extruders.

- ✓ `DEFAULT_RETRACT_ACCELERATION` ist dasselbe wie die vorherige Einstellung, aber spezifisch für das Zurückziehen aller Extruder. Sie müssen schnell sein, um zu verhindern, dass Streifen und Blasen an Ihren 3D-Drucken entstehen. Ein Beispielwert für eine solche Einstellung ist 380.

Die letzten Bewegungseinstellungen, die Sie ändern können, sind die JERK-Werte. Sie definieren sichere Werte für die unmittelbare Bewegung der Achse und des Extruders. Die Z-Achse – die in der Regel aus einer innerhalb einer Mutter bewegten Gewindestange besteht – bewegt sich normalerweise langsam. Die schnellste Beschleunigung einer Z-Achse ist in der Regel immer noch sehr viel langsamer als die aller anderen Motoren. Extruder benötigen außerdem sehr viel Drehmoment. Damit sich dieser ordnungsgemäß entwickeln kann, brauchen Sie einen langsamen Ausgangspunkt für ihre Beschleunigung. Die X- und Y-Achsen schließlich können nicht unmittelbar schnell starten; sie brauchen einen Einstellwert, der die Maschine entsprechend anweist. Typische JERK-Werte für eine Prusa i3-Maschine könnten `XYJERK 20.0`, `ZJERK 0.4` und `EJERK 12.0` sein. Die Werte sind in mm/s angegeben.



Bei einem Delta-Drucker wie dem RostockMAX haben Sie keine langsame Z-Achse, der ZJERK-Wert kann also auf denselben Wert wie XYJERK gesetzt werden.

## Die Marlin-Firmware in die RAMPS-Elektronik hochladen

Nachdem Sie in der Datei `configuration.h` alle für Ihren Drucker spezifischen Änderungen vorgenommen haben, können Sie sie speichern. Anschließend überprüfen Sie, ob die folgenden Einstellungen richtig sind:

- ✓ Überprüfen Sie, dass Sie auf der Registerkarte `TOOLS|BOARD` die richtige Arduino-Karte für Ihre Elektronik ausgewählt haben. Für unsere RAMPS-Elektronik auf dem Prusa i3 wählen wir Arduino MEGA 1280 oder 2560 aus (abhängig von dem Modell der in unserem Bausatz enthaltenen Arduino-Karte).
- ✓ Wählen Sie den seriellen Port aus, an den Ihre Elektronik über das USB-Kabel angeschlossen ist. Wählen Sie auf der Registerkarte `SKETCH` die Einstellung `VERIFY|COMPILE`. Wenn Sie keine Fehler beim Anschluss der Elektronik gemacht haben, können Sie die überarbeitete Firmware über ein USB-Kabel in die Elektronik hochladen (siehe Abbildung 13.19).

Die kritischen Einstellungen für Ihren 3D-Drucker werden wir in Kapitel 15 berechnen und genauer betrachten. Dabei handelt es sich um Kalibrierungen für Bewegung, Heizung und Durchflussrate des Extruders. Dafür werden Sie wieder Änderungen in der Firmware vornehmen müssen, sie neu kompilieren und hochladen. Sie sollten sich also mit der Arduino-Software vertraut machen. Weitere Informationen finden Sie auf der Website [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc).

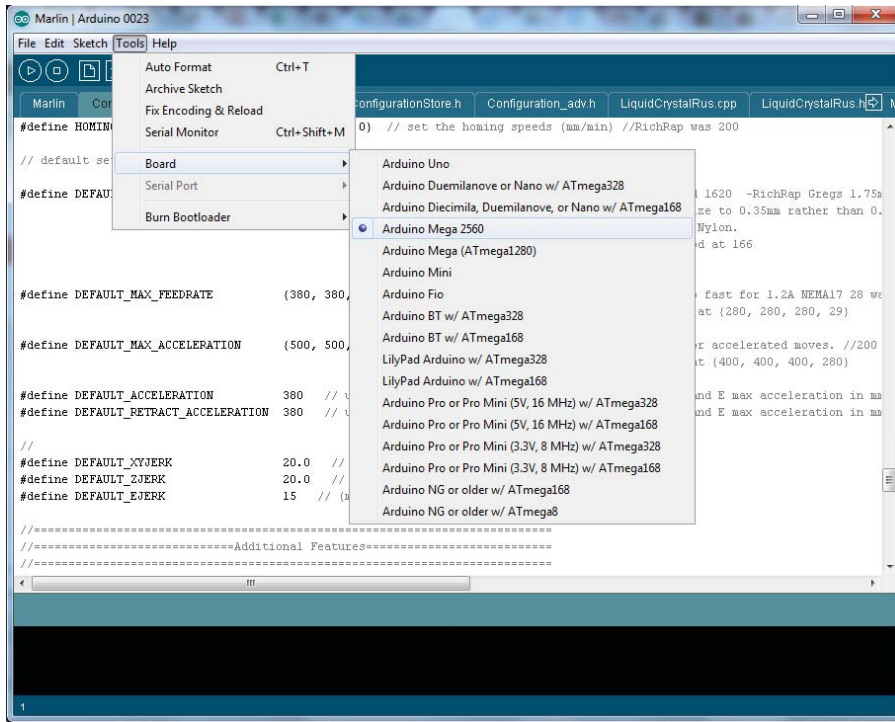


Abbildung 13.19: Für die meisten RepRap-Elektroniksysteme wie RAMBo, RAMPS, RUMBA und RepRapEasy müssen Sie die Arduino MEGA 1280 oder MEGA 2560 auswählen.



Wir empfehlen Ihnen das Buch *Arduino für Dummies* von John Nussey (Wiley). Dieses fantastische Buch verschafft Ihnen eine detaillierte Kenntnis der Programmiersprache Arduino (und der anderen in diesem Abschnitt beschriebenen Prozesse), insbesondere wenn Sie Teile der Marlin-Firmware weiterentwickeln wollen.



# Montage des RepRap-Extruders und Aufrüstung des RepRap-Druckers

# 14

## ***In diesem Kapitel***

- ▶ Thermoplast-Extruder betrachten
- ▶ Spritzen- und pastenbasierte Extruder vergleichen
- ▶ Mehrfarbige 3D-Drucke einrichten
- ▶ Betrieb und Aufrüstung der Extruder erklären

---

**I**n diesem Kapitel zeigen wir Ihnen, wie Sie einen RepRap-Extruder montieren, und beschreiben, wie er funktioniert. Hier erfahren Sie, wie Sie während des Druckens alles am Laufen halten. Wir betrachten alternative Materialien und erklären, wie Sie auf Ihrem RepRap darauf drucken. Anschließend zeigen wir Ihnen, wie Sie mehrfarbig drucken können, und Sie erhalten Tipps, wie Sie selbst farbenprächtige Drucke erstellen.

## ***Thermoplast-Extrusion***

Wie bereits erwähnt, ist der Extruder eines der wichtigsten Teile des 3D-Druckers. Die Qualität und Zuverlässigkeit dieser Teile ist unabdingbar.

Sie können alle für einen Extruder erforderlichen Teile mit einfachen Werkzeugen und unter sehr viel Zeitaufwand selbst herstellen, aber für diesen Teil des 3D-Druckers ist es sinnvoll, optimal gefertigte Teile zu kaufen, die gut zusammenpassen und keine Lecks aufweisen oder unkontrolliert schmelzen.

Alle Extruder müssen dieselbe Aufgabe erledigen: den runden Kunststofffaden aufnehmen und kontrolliert zum heißen Ende (Hot-End) transportieren, wo er geschmolzen und aus der Düse ausgegeben wird. Das hört sich ganz einfach an, aber wenn Sie die zahlreichen Teile betrachten, aus denen ein Extruder (und übrigens auch ein Hot-End) besteht, werden Sie erkennen, warum in diesem Bereich die meisten Probleme für private Anwender von 3D-Druckern auftreten.

Wir beginnen mit dem *Fördermechanismus für den Faden*. Dieser Teil hat fast immer die Form eines runden Bolzens oder einer Stange mit konkav geschnittenen Zähnen, die den Kunststoff greifen (siehe Abbildung 14.1).



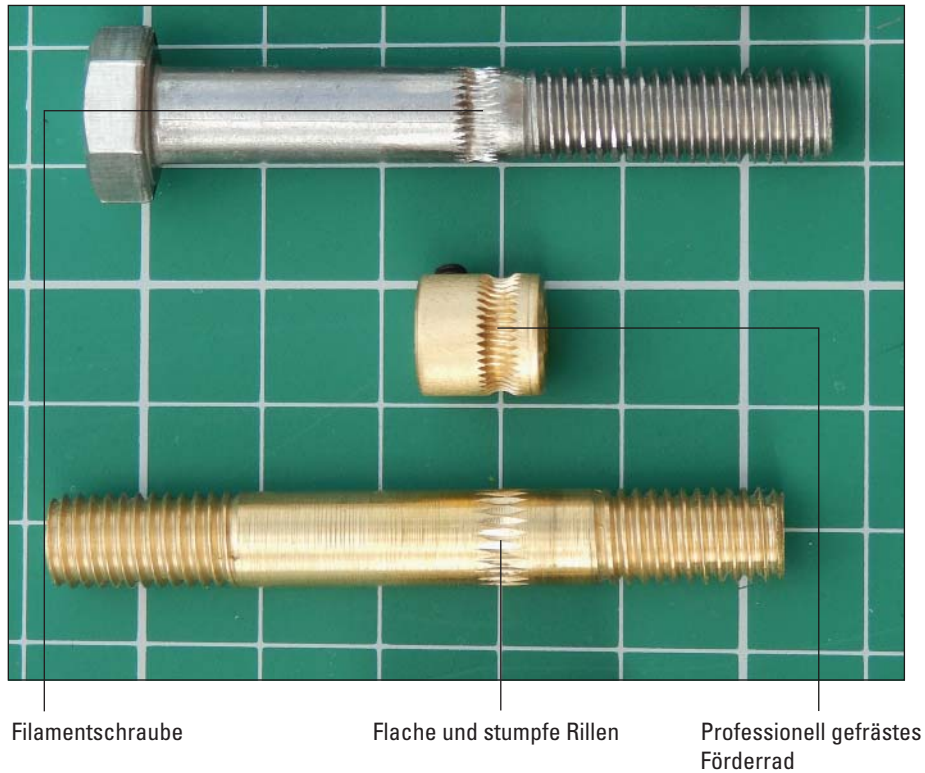


Abbildung 14.1: Fördermechanismen für den Faden in Thermoplast-Extrudern



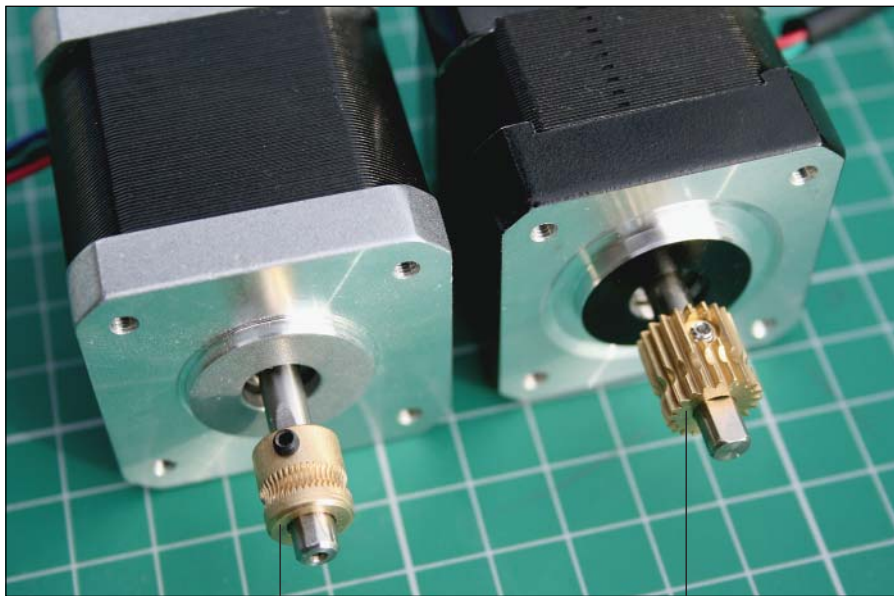
Fördermechanismen für den Faden können auf unterschiedlichste Arten hergestellt werden. Es ist wichtig, dass Sie auf gleichmäßige und gut geschnittene Zähne achten, die Ihren Faden greifen, aber nicht abschälen oder abschleifen. Zu scharfe Zähne können genauso schlecht wie zu stumpfe Zähne sein.

Fördermechanismen für Thermoplast-Extruder übernehmen alle dieselbe Aufgabe, werden aber sehr unterschiedlich hergestellt. Oben in Abbildung 14.1 sehen Sie eine traditionelle *Filamentschraube*. Dies ist der gebräuchlichste Fördermechanismus für den Faden und funktioniert angemessen. In der Mitte sehen Sie ein professionell gefrästes Förderrad, das in der Regel den besten Griff um den Faden hat, wenn dieser in den Extruder geschoben wird. Dieses Rad wird größtenteils direkt auf der Welle des Extrudermotors montiert, oder auf einem am Motor angebrachten Ritzel. Unten in Abbildung 14.1 sehen Sie eine weitere gefräste Stange, hier aber mit flachen, stumpfen Rillen. Dieses Design greift nicht so fest zu, doch wenn es zu fest angezogen wird, kann es Ihren Faden verformen.

Es gibt viele verschiedene Möglichkeiten, einen Extruder zu montieren. In der einfachsten Form wird das Förderrad für den Faden direkt auf der Welle des Schrittmotors für den

Extruder montiert und transportiert den Faden direkt durch Drehung der Motorwelle. Diese Methode erzeugt das niedrigste Drehmoment, aber es werden nur wenige andere Komponenten benötigt.

Dieser grundlegendste Faden-Extruder bringt eine angemessene Leistung, aber nur dann, wenn Sie einen leistungsfähigen Antriebsmotor und ein gut angefertigtes Hot-End haben, damit die für den Transport des Fadens erforderlichen Kräfte so weit wie möglich reduziert werden. Links in Abbildung 14.2 sehen Sie dasselbe professionell angefertigte Förderrad wie in Abbildung 14.1. Rechts sehen Sie ein sehr einfaches Antriebszahnrad, das mit einer Rille für den Faden hergestellt wurde. Dieses Zahnrad ist in der Herstellung sehr kostengünstig, erbringt aber auch die geringste Leistung. Es hat kein Zahnrad, um das Drehmoment zu verbessern, und sollte möglichst nicht verwendet werden. Diese Direktantrieb-Extruder haben einen Vorteil: Es können zwei davon nebeneinander angeordnet werden, um eine duale Extrusion zu realisieren.



Professionell hergestelltes  
Förderrad

Gefrästes Antriebszahnrad

*Abbildung 14.2: Der grundlegendste Faden-Extruder kann eine ausreichende Leistung bieten.*

Am Ausgang eines Schrittmotors kann ein kompaktes Getriebe angebracht werden, was das Drehmoment und die Drehauflösung der zuvor beschriebenen Direktantriebstypen maßgeblich verbessern kann (siehe Abbildung 14.3). Diese können sehr kompakt sein und gestatten eine duale Extrusion.

Bei RepRap-3D-Druckern ist es gebräuchlicher, dass der Motor an mehrere 3D-gedruckte Zahnräder angeschlossen ist (siehe Abbildung 14.4). Wenn das Getriebe den Motor beschleunigt, wird damit das Drehmoment erhöht und der Faden kann sehr schnell in das Hot-End



*Abbildung 14.3: Ein professionelles Getriebe am Schrittmotor verbessert die Leistung (selbst bei einem kleineren Motor).*

transportiert werden. Diese Anordnung gestattet ein schnelles Drucken und ein schnelles Zurückziehen.

Ein weiterer gebräuchlicher Extruder ist der Bowden, der nach demselben Prinzip arbeitet wie das Bremshebelkabel an einem Fahrrad: Eine glatte Teflon-Röhre (PTFE) trennt den Extruderantriebsmotor vom Hot-End. Diese Röhre gestattet, dass der transportierte Faden erfasst und in den Hot-End-Abschnitt weitergeschoben wird.

Der Bowden-Extruder wird häufig bei kleinen oder leichten Maschinen eingesetzt. Dies hat mehrere Vorteile:

- ✓ Das Design befreit den Motor von Masse und Gewicht beim Transport des Wagens, sodass nur noch das Hot-End übrig bleibt.
- ✓ Sie können mehr Hot-Ends an einem 3D-Drucker anbringen.
- ✓ Das Design kann ideal für Maschinen sein, die einen leichten Kopf benötigen, der sich schnell bewegt.

Ein Bowden-Extruder hat auch Nachteile:

- ✓ Das Drucker-Design besteht aus mehreren Teilen und wird damit komplexer.



Abbildung 14.4: Die 3D-gedruckten Zahnrad-Extruder bestehen aus mehreren Teilen, können aber eine höhere Leistung und Geschwindigkeit für schnellere Drucke liefern.

- ✓ Der Drucker muss den Faden nach jeder Druckbewegung weiter zurückziehen, um ein Herausquellen aufgrund des Drucks und der Federwirkung des in die Röhre geschobenen Fadens zu minimieren.
- ✓ Das Design ist häufig schwieriger zu steuern und zu tunen.

Das in Abbildung 14.5 gezeigte Bowden-Modell verwendet eine 1 m lange PFTE-Röhre. Sie wäre für einen größeren 3D-Drucker geeignet, der Modelle mit Breiten von mehr als 500 mm erzeugt.

Jeder Extruder braucht ein *Zwischenrad*, das den Faden in die Zähne des Förderrads schiebt. Ein Zwischenrad ist in der Regel ein Rundlager, das mit einer Feder oder mit einer Gummibuchse angedrückt wird. Abbildung 14.6 zeigt ein Zwischenlager/-rad an einem gedruckten Hebel. Die Feder auf der linken Seite bewirkt, dass das Lager in das Förderrad gedrückt wird, sodass der Faden fest gegriffen wird.



Ziehen Sie das Zwischenlager nicht zu stark an. Wenn der Griff des Fadens so stark ist, dass er zusammengequetscht wird, ist es sehr viel schwieriger, die thermische Isolierung am Hot-End zusammenzudrücken und es kann eine Verstopfung entstehen. Überprüfen Sie, wie weit sich das Förderrad in den Faden beißt. Sie sollten für jeden Zahn kleine, regelmäßige Abdrücke sehen, wo sich der Zahn eingedrückt hat, und der Faden sollte nicht beschädigt sein.



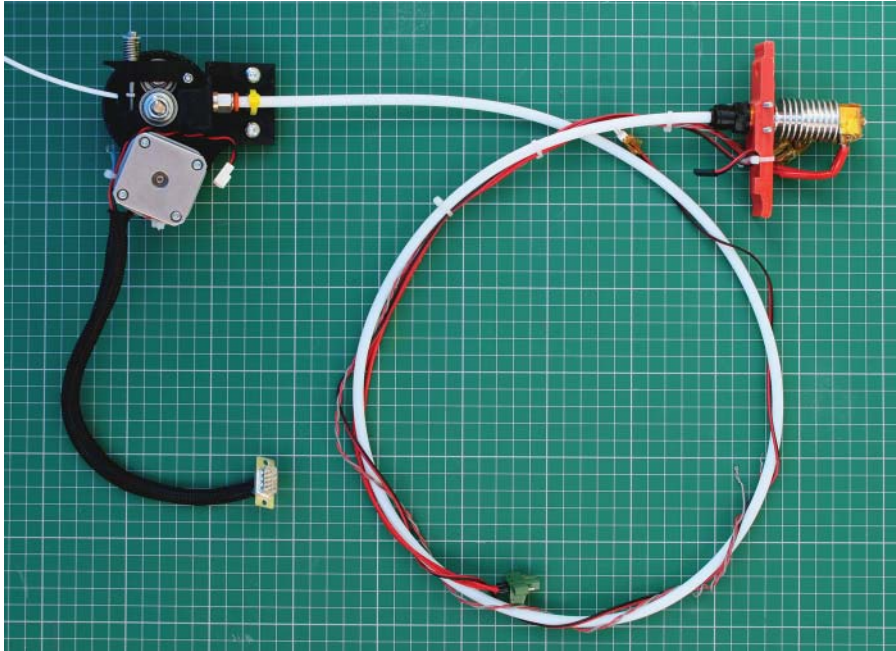


Abbildung 14.5: Ein Bowden-Extruder

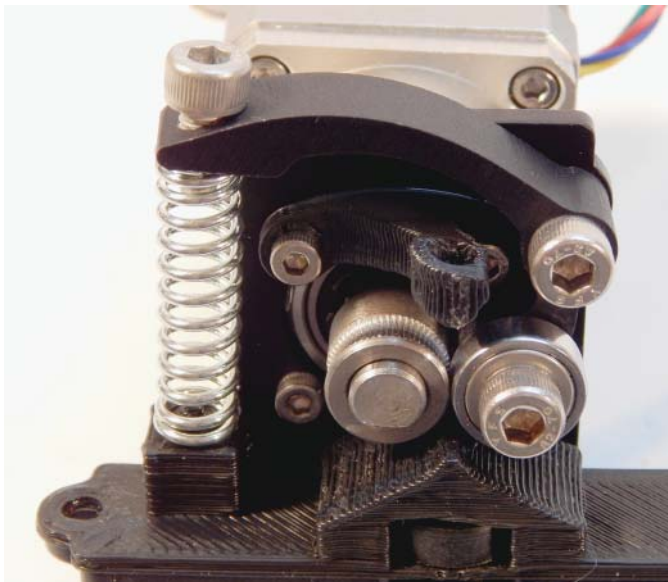
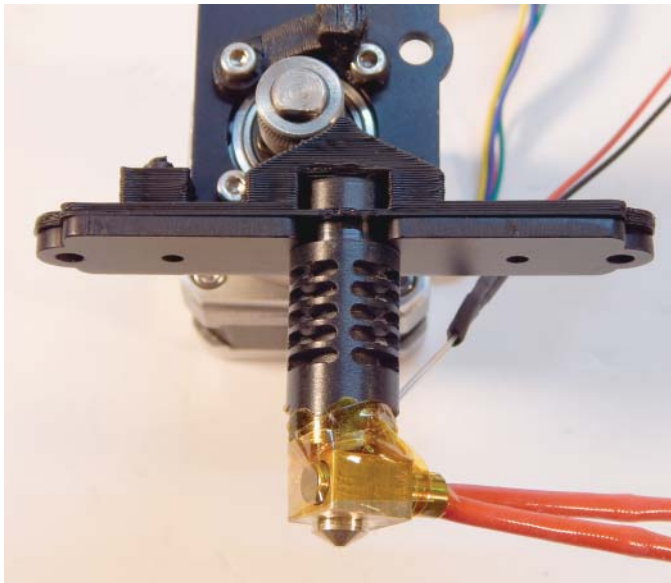


Abbildung 14.6: Das Zwischenrad ist wichtig. Es muss so stark angezogen werden, dass das Förderrad den Faden greifen kann.

Das Hot-End ist normalerweise mit Schrauben am Extruderrumpf angebracht, sodass es entfernt werden kann, wenn der Extruder verstopft oder blockiert. Ein fertiger Extruder benötigt ein Heizelement am Hot-End und einen Temperatursensor (siehe Abbildung 14.7). Diese Verdrahtung muss zusammen mit den vier Motoranschlüssen zurück zur Elektronikverdrahtung des RepRap verlaufen, wie in Kapitel 13 beschrieben.



Versuchen Sie keinesfalls, den Motor oder die Zahnräder für die Förderung des Fadens zu drehen, wenn das Hot-End nicht die richtige Temperatur hat. Dabei kann der Faden reißen und sich stauchen. Wenn das passiert, müssen Sie die Zähne Ihres Förderrads reinigen, bevor Sie wieder drucken können.



*Abbildung 14.7: Unser verdrahtetes Hot-End, am Motor und an der Antriebsbaugruppe montiert. Hier handelt es sich um einen vollständigen Thermoplast-Extruder mit gefrästem Antrieb.*

Ein Thermoplast-Extruder muss sorgfältig kalibriert werden, damit er optimal funktioniert. Wir beschreiben die Schritte für eine sinnvolle Kalibrierung in Kapitel 15.

Wie in Abbildung 14.8 gezeigt, entstehen gerade für den Extruder sehr viele neue Entwicklungen im RepRap-Bereich. Es gibt zahlreiche verschiedene Designs, eines spezifischer als das andere. Sie unterstützen höhere Temperaturen, eine schnellere Extrusion und feinere Details. Die meisten davon sind für den privaten 3D-Druck mit Thermoplast geeignet.

## Montage des Extruders und des Hot-Ends für den Prusa i3

Im letzten Schritt unserer Beispielkonstruktion erfolgt die Montage des Extruders und des Hot-Ends. Wir verwenden einen modernen, kompakten Extruder mit Antrieb (siehe Abbildung 14.7) und J-Kopf-Hot-End (siehe Abbildung 11.17).



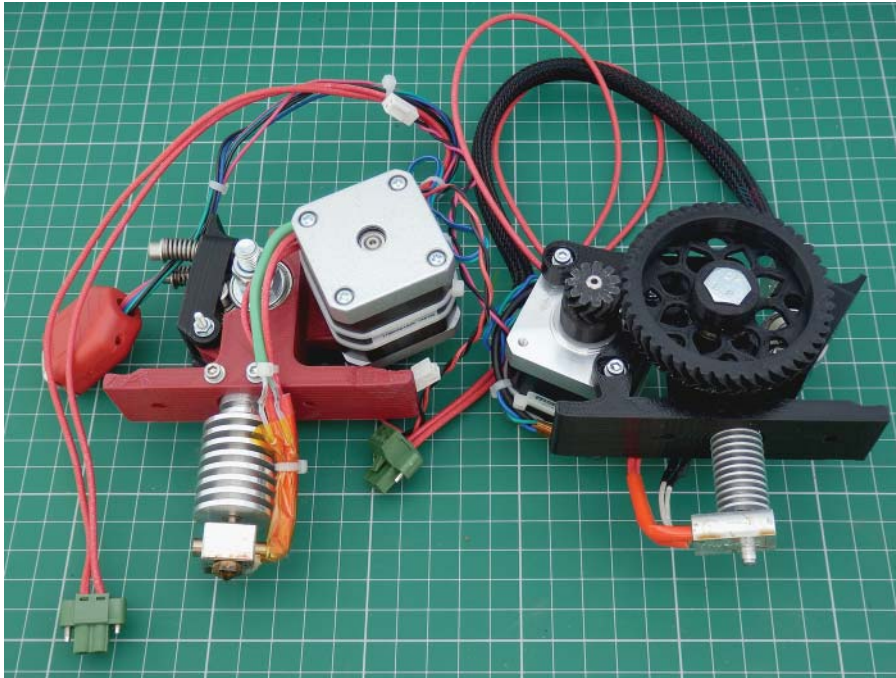


Abbildung 14.8: Verschiedene Designs für RepRap-Extruder

Wir haben diesen Prozess in fünf allgemeine Schritte unterteilt:

1. Anbau des Faden-Fördermechanismus an die Motorwelle
2. Montage des Zwischenraddrucklagers für den Extruder
3. Montage des J-Kopf-Hot-Ends
4. Anbau des montierten Extruders an den X-Wagen
5. Verdrahtung des Hot-End-Heizers und des Thermistors an RAMPS

In den nächsten Abschnitten werden diese Schritte genauer erklärt.

### **Anbau des Faden-Fördermechanismus an die Motorwelle**

Die Anbringung des Faden-Fördermechanismus an die Motorwelle ist ganz einfach. Unser Schrittmotor besitzt bereits ein Zahnrad. Damit haben wir eine sehr kompakte und leichte Methode, einen kleinen, leistungsfähigen Extruder herzustellen. Andere Extrudertypen verwenden gedruckte Zahnräder, um eine vergleichbare Aufgabe zu erledigen, aber eine gebräuchlichere Option ist die Verwendung fertiger Getriebe-/Motor-Baugruppen, um die

Betriebslebensdauer des Druckers zu verlängern und die Druckqualität zu verbessern. Wir bringen also einfach nur das Förderrad an der Motorgetriebewelle an und ziehen es mit einem Inbusschlüssel fest.

Ein Beispiel für ein solches Förderrad sehen Sie in Abbildung 14.1. Abbildung 14.3 zeigt einen anderen Typ, der an den angetriebenen Motor angebaut ist. Sie alle leisten dasselbe.

Möglicherweise müssen Sie auch eine Klammer oder einen gedruckten Adapter montieren, abhängig von dem verwendeten Motor und seinem Lieferumfang. (Eine geeignete Montageklammer finden Sie in Abbildung 14.3.)

### *Montage des Zwischenraddrucklagers für den Extruderantrieb*

Das Zwischenraddrucklager übernimmt eine sehr wichtige Aufgabe, nämlich den Faden an das Förderrad zu drücken, sodass der drehende Motor den Faden in das Hot-End transportieren kann. Weitere Informationen finden Sie in Abbildung 14.6. Die folgenden allgemeinen Schritte zeigen einen Überblick:

1. Normalerweise wird ein 3D-gedruckter Hebel für das Zwischenrad bereitgestellt. Dazu montieren wir ein kleines Lager, Größe 623, wie in Abbildung 14.6 gezeigt.
2. Die Zwischenradbaugruppe wird an dem Motorgehäuse angebracht, sodass sie einen Hebel bildet.
3. Eine Feder wird zwischen die Zwischenradbaugruppe und die Montageklammer gedrückt, um das Zwischenradlager an das Faden-Förderrad zu drücken.
4. Eine kleine, 3D-gedruckte Führung wird mit einer 10 mm langen M3-Schraube an dem Motorgehäuse angebracht. Damit wird der Faden in die Lücke zwischen Förderrad und Zwischenraddrucklager geführt.

### *Anbringung des J-Kopf-Hot-Ends*

Das J-Kopf-Hot-End wird sehr wahrscheinlich als fertig montierte Einheit geliefert. Glücklicherweise können auch andere kompatible Hot-Ends wie beispielsweise das Pico von B3 Innovations, die Prusa V2-Düse oder die V5 von E3D in genau derselben Montage verwendet werden. Beispiele für solche kompatiblen Hot-Ends finden Sie in Kapitel 11 in Abbildung 11.17. Dort sehen Sie auch einen demontierten J-Kopf von MK5 als Referenz.



Darauf sollten Sie bei der Montage des J-Kopf-Hot-Ends achten:

- ✓ Das J-Kopf-Hot-End (oder ein kompatibles) besitzt eine Rillenmontage oben an der Einheit. Damit klemmen Sie es in eine entsprechende Öffnung der Metallplatte oder eines 3D-gedruckten Adapters, wie sie bei den meisten J-Kopf-Hot-Ends zu finden sind.

Sorgen Sie dafür, dass Sie dabei keine Drähte einklemmen – und seien Sie vorsichtig mit den dünnen Thermistorverdrahtungen am J-Kopf-Rumpf.

- ✓ Einige Montagen werden einfach nur eingesteckt, für andere müssen 16 mm lange M4-Schrauben oder 20 mm lange M3-Schrauben verwendet werden, um sie zu befestigen.

### Anbau des montierten Extruders am X-Wagen

Dies ist in der Regel eine sehr einfache Aufgabe. Sie brauchen nur zwei M3- oder M4-Schrauben, um den Extruderrumpf am X-Wagen Ihrer Maschine zu befestigen. Für das Prusa i3-Design können verschiedene Montagen aus dem Hauptverzeichnis heruntergeladen werden:

<https://github.com/josefprusa/Prusa3-vanilla>

oder von Thingiverse unter

<http://www.thingiverse.com/search?q=prusa+i3+extruder&sa=>

### Verdrahtung des Extruders an die RAMPS-Elektronik

Im letzten Schritt unserer Konstruktion verdrahten Sie den Extrudermotor, den Heizer für das Hot-End und den Thermistorsensor an unserer RAMPS-Elektronik. Denken Sie daran, die Anleitung für die RAMPS-Verdrahtung zu lesen (wie wir es in Kapitel 13 getan haben), unter:

<http://reprap.org/mediawiki/images/6/6d/Rampswire14.svg>

Gehen Sie nach den folgenden allgemeinen Schritten vor:

1. Die Verdrahtung des Extrudermotors erfolgt auf genau dieselbe Weise wie die in Kapitel 13 beschriebene Verdrahtung der X-, Y- und Z-Motoren.
2. Wenn der Extrudermotor verdrahtet ist, schließen Sie ihn an Extruder E0 der RAMPS-Karte an.
3. Schließen Sie den Thermistor an. Der Zweifachkopf kann in jede Richtung arbeiten und wird an T0 angeschlossen.
4. Schließen Sie den Heizer für das Hot-End in beliebiger Ausrichtung an die D10-Schraubklemmenanschlüsse an.



Verwenden Sie wenn möglich Aderendhülsen.

Jetzt können Sie Ihre Maschine kalibrieren, wie in Kapitel 15 beschrieben. Danach können Sie Ihren ersten 3D-Druck in Angriff nehmen.

## Spritzen- und pastenbasierte Extrusion

Die Verwendung von Pasten und Tonmaterial ist für RepRap-Drucker nicht gebräuchlich, stellt aber eine der einfachsten 3D-Druckformen dar. Sie können einen auf einer Spritze basierenden Extruder für Ihren RepRap-3D-Drucker ausdrucken und sofort anfangen, damit zu experimentieren.

In den Anfängen der privaten 3D-Drucker wurden im Fab@Home-Projekt ([www.fabathome.org](http://www.fabathome.org)) Open Source-Drucker entwickelt, die die verschiedensten Pasten anstelle von Thermoplastmaterialien verwendeten. RepRap war ein wenig zu langsam, um Pastenmaterialien für den Druck zu verwenden, aber für manche Zwecke können sie ideal sein.

Wir beschäftigen uns schon seit Längerem mit dem 3D-Druck unter Verwendung von Spritzen. Doch bei unseren Versuchen auf unserem eigenen RepRap haben wir recht schnell erkannt, warum das Ganze nicht so beliebt ist, wie man vielleicht annehmen möchten: Es ist einfach sehr schwierig, das Material zu kontrollieren. Viele frühe Versuche verwendeten für die Extrusion von Paste Druckluft, um das Material aus der Spritze zu drücken, wobei häufig der Anfang und das Ende des Materialflusses nicht kontrolliert werden konnten. Wenn man einmal angefangen hatte, das Objekt zu drucken, musste es komplett fertiggestellt werden. Das war kein Problem, wenn man (beispielsweise) einen flachen Keks drucken wollte, aber für einen wirklich dreidimensionalen Druck war diese Technik wenig geeignet.

Wir beschlossen, den 3D-Drucker mit einem Extruderdesign auszustatten, das ähnlich wie ein traditioneller Thermoplast-Extruder kontrolliert werden konnte. Ein paar Modelle und einen Geistesblitz später entstand schließlich der *Universelle Pasten-Extruder* (siehe Abbildung 14.9). Statt Druckluft verwendet dieses Design einen normalen Schrittmotor, um einen Zahnriemen anzutreiben, der mechanisch einen Spritzenkolben nach unten drückt, sodass schichtweise Paste auf die Druckplattform ausgegeben wird. Dieses Design wurde als Open Source-Projekt veröffentlicht. Innerhalb kürzester Zeit verwendeten es Anwender auf der ganzen Welt, entwickelten Designvarianten, passten es für verschiedene Zwecke an und bauten es an alle möglichen Maschinen an. Genau so soll Open Source-Technologie funktionieren.

Der Universelle Pasten-Extruder kann ganz einfach auf jedem RepRap-Drucker eingesetzt werden. Aus der Perspektive der Steuerelektronik führt der Schrittmotor dieselbe Aufgabe aus wie ein Thermoplast-Extruder. Um damit zu arbeiten, brauchen Sie nur die Anzahl der Schritte neu einzustellen, die der Motor machen muss, um eine bestimmte Menge Material auszugeben. Mit einem Pasten-Extruder können Sie mit allen möglichen Materialien experimentieren (siehe Abbildung 14.10). Bevorzugt verwenden wir Ton und Keramik – wenn das Ganze schiefgeht, kann man dieses Material einfach von der Druckplatte kratzen, ein bisschen Wasser hinzufügen und es erneut probieren.



Wenn Sie Pastenmaterialien verwenden, sollten Sie einen Bogen Pergamentpapier oder Alufolie auf Ihre Plattform legen. Damit verhindern Sie, dass Materialien nicht so schnell austrocknen und leicht entfernt werden können.

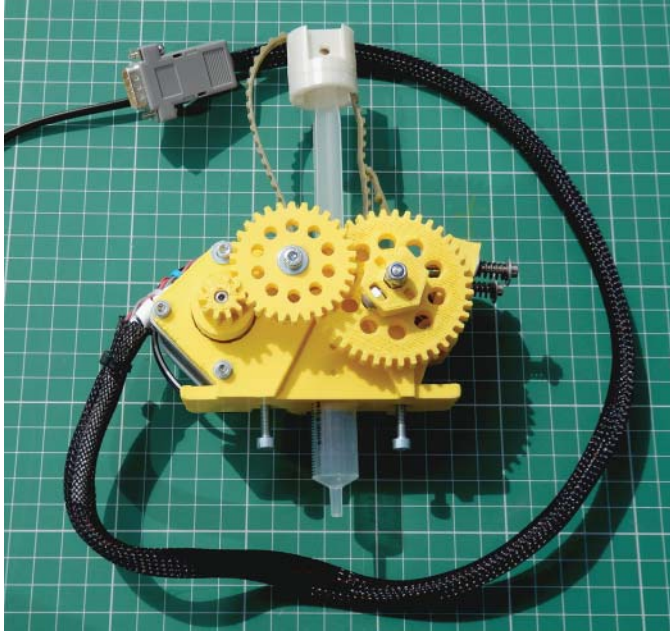


Abbildung 14.9: Der Universelle Pasten-Extruder

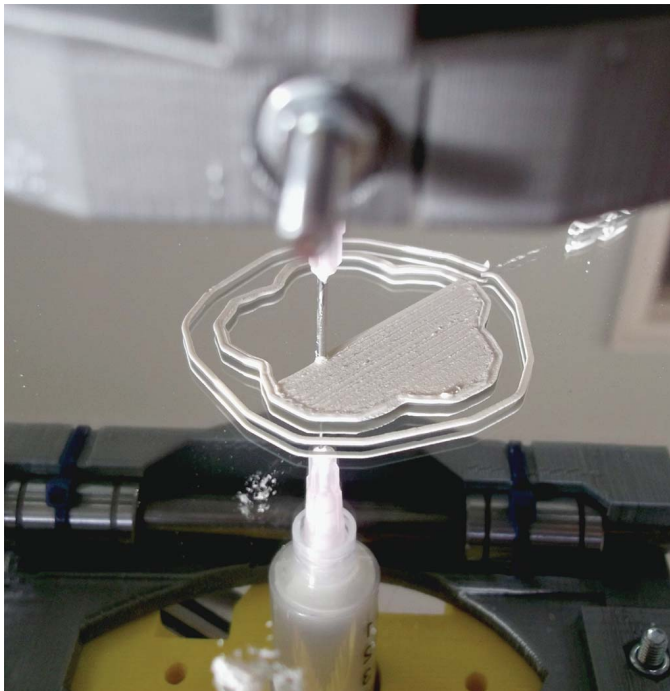


Abbildung 14.10: Der Universelle Pasten-Extruder druckt Porzellanerde auf Spiegelglas. Achten Sie auf die Spritze, die am Extruder befestigt ist. Die Erde wird durch eine feine Düse ausgedruckt



Auf diese Weise können wertvolle Metallerden und andere Keramikmaterialien in 3D-Modelle oder Schmuck extrudiert werden. Nach dem Trocknen können die Teile auch gebrannt oder manuell abschließend bearbeitet werden.

Neben den auf Ton basierenden Materialien können Sie auch mit Gels, verschiedenen Silikon-Dichtmitteln und (natürlich) unterschiedlichen Lebensmitteln (zum Beispiel mit Zuckerpaste, erwärmter Schokolade, Marzipan und Zuckerguss) drucken, wenn Sie eine weiche Paste daraus anfertigen können. Die Anwender haben schon mit verschiedensten Teigmischungen experimentiert, die direkt über einer heißen Bratpfanne ausgedruckt wurden, um benutzerdefinierte Waffeln und Pancakes zu backen (siehe Abbildung 14.11).



*Abbildung 14.11: Für die Muffin-Mischung brauchen Sie nur eine einfache Spritze ohne Nadel, die einen 3 mm starken Extrusionswulst erzeugt.*

Cremes sind sehr gut für 3D-Experimente mit Lebensmitteln geeignet. Und auch Maismehl (für die Herstellung von Chips) ist ein perfektes Lebensmittel für den 3D-Druck. Es haftet an sich selbst und nach der Ausgabe auf ein Backblech oder eine Silikonfolie können Sie es backen und erhalten den ultimativen Knabberspaß (siehe Abbildung 14.12).





*Abbildung 14.12: Maismehl ist ein perfektes Lebensmittel für den 3D-Druck.*

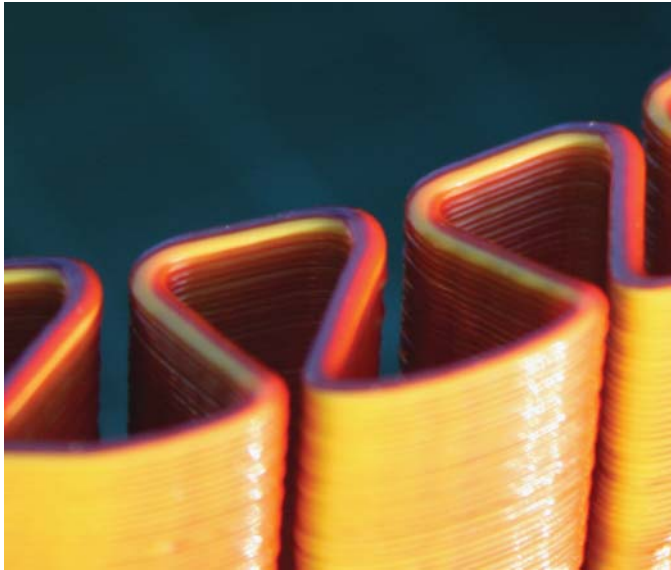


Wenn Sie einen eigenen Universellen Pasten-Extruder ausdrucken wollen, finden Sie die vollständige Bauanleitung und den Download für die Teile des 3D-Modells unter <http://richrap.com/?p=60>.

## Mehrfarbige Drucke

Ein weiteres Entwicklungsziel für RepRap-Drucker ist der Ausdruck in vielen verschiedenen Farben – gleichmäßig gemischt und kontrolliert, in genau der Farbe, die Sie sich wünschen, aus fünf oder sechs Hauptmaterialien. Der vollfarbige 3D-Druck ist immer noch ein wenig Zukunftsmusik, aber es gibt schon verschiedene Methoden, die Ihre 3D-gedruckten Objekte verschönern. In diesem Abschnitt geht es um das Drucken mit mehreren Extrudern, Farbmischungen und um einfache Methoden, beeindruckende Ergebnisse zu erzielen, selbst mit nur einem Extruder.

In einem der vielen RepRap-Experimente an der britischen Bath Universität haben Myles Corbett und Dr. Adrian Bowyer die Mischung von zwei verschiedenen Farben in einer Düse



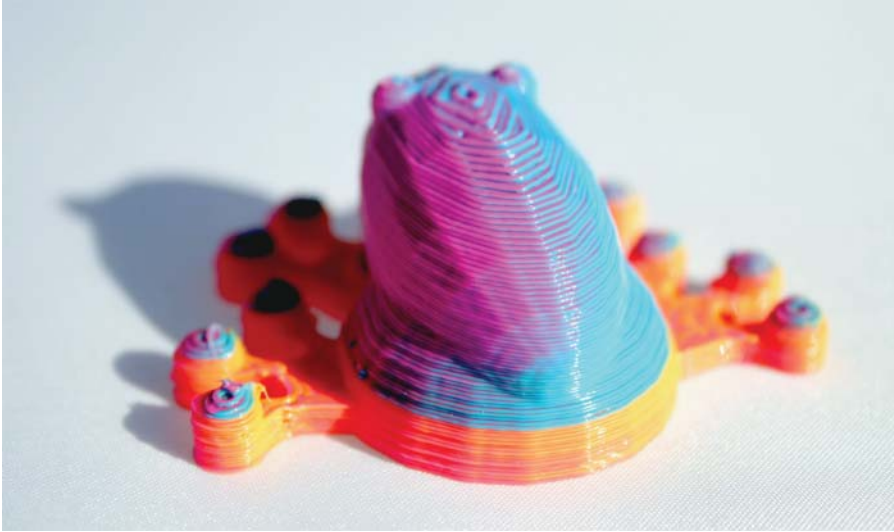
*Abbildung 14.13: Der Zahncreme-Effekt, beobachtet bei der Einführung unterschiedlich gefärbter Materialien in ein Hot-End*

untersucht. Sie haben erkannt, dass sich die Kunststoffmaterialien nicht natürlich vermischen. Stattdessen kommen sie zusammengesetzt aus der Düse, ähnlich wie gesteierte Zahncreme (siehe Abbildung 14.13). Daraufhin entwickelten sie den Extruder weiter. Irgendwann hatten sie alle Klappen, Kammern und passiven Methoden für die Mischung ausprobiert und kamen zu dem Schluss, dass nur eine aktive Methode, den geschmolzenen Kunststoff innerhalb des Hot-Ends anzurühren, eine Ausgabe mit wirklich gemischter Farbe erzeugen würde. Das probierten sie aus – und es funktionierte.

Falls Sie mehr über diese Arbeit lesen möchten, mit einem hervorragenden Bericht über die Farbmischung in Bath (insgesamt mehr als 50 MB), finden Sie sie in der RepRap-Wiki:

[www.reprap.org/mediawiki/images/0/05/RepRapColourMixingReport-jmc.pdf](http://www.reprap.org/mediawiki/images/0/05/RepRapColourMixingReport-jmc.pdf)

Die Entwicklungsbemühungen von Richard, Farbe und Material zu mischen, haben zur Schaffung eines 3-fach-Extruders geführt, der drei Materialien in eine Düse einspeist. Dabei fand er heraus, dass jeder Extruder kontrolliert werden kann, und dass der Zahncreme-Effekt interessant ist, weshalb er entschied, kein aktives Mischsystem zu implementieren. Dieser Ansatz hat zu mehreren einzigartigen Druckobjekten geführt, wobei zwei oder drei Seiten eines Objekts unterschiedliche Farben aufweisen (siehe Abbildung 14.14).



*Abbildung 14.14: Eine 3-fach-Mischdüse mischt Cyan, Magenta und Gelb und erzeugt einen psychedelisch anmutenden Frosch, der unterschiedliche Farben aus unterschiedlichen Blickwinkeln aufweist.*



Weitere Details zu diesem Ansatz für die 3-fach-Farbmischung finden Sie hier: <http://richrap.com/?p=121>.

Eine sehr viel gebräuchlichere Methode, einen zweifarbigen Druck zu erzeugen, ist die Verwendung von zwei separaten Extrudern und zwei Hot-Ends. Sie laden eine Farbe in den ersten Extruder und eine zweite in den zweiten. Dabei können Sie auch unterschiedliche Materialien verwenden, wenn sie gut zusammen gedruckt werden können. Das ist etwas komplizierter. Die allgemeinen Schritte (unter Verwendung von Thermoplast) sehen wie folgt aus:

1. Entwerfen Sie zwei separate 3D-Objekte, die zusammenpassen, und laden Sie sie beide in Ihre Slicing-Software.
2. Geben Sie für jedes Druckobjekt einen bestimmten Extruder an und verarbeiten Sie beide Objekte zu einer G-Code-Datei, die der Drucker versteht.
3. Der 3D-Drucker heizt beide Extruder an. Während er die erste Schicht des ersten Objekts mit Extruder 1 druckt, senkt er die Temperatur des zweiten Extruders so weit ab, dass der Kunststoff nicht herausquillt.

4. Anschließend wird die Temperatur des ersten Extruders abgesenkt und Extruder 2 druckt die erste Schicht des zweiten Modells.
5. Der ganze Prozess wird so lange wiederholt, bis beide Modelle ausgedruckt und zu einem Objekt mit zwei verschiedenen Farben verbunden wurden.

Für jedes Objekt wird ein Extruder vorgegeben. Jeder Extruder ist mit einem Faden einer anderen Farbe ausgestattet. Weitere Informationen über die Verwendung mehrerer Extruder finden Sie in Kapitel 15.

Was passiert, wenn Sie nur einen Extruder haben, aber Mehrfarbendrucke ausprobieren möchten? Es gibt verschiedene Methoden, wirklich beeindruckende und farbenprächtige Ergebnisse auf fast jedem RepRap-3D-Drucker auszudrucken.

Als Richard seine ersten mehrfarbigen Objekte erzeugte, entwarf er einen einfachen Faden-Verbinder. Damit war es möglich, verschiedene Abschnitte unterschiedlicher Fäden zu verschmelzen. Bei Verwendung des aus mehreren farbigen Abschnitten bestehenden Fadens in einem 3D-Drucker entstehen Objekte mit Streifen unterschiedlicher Farben.

Es wurde offensichtlich, dass man alle möglichen Objekte in vielen verschiedenen Farben erzeugen kann, indem man erstens die Funktionen des Objekts so entwirft, dass sie unterschiedliche Schichthöhen haben, und zweitens unterschiedlich gefärbte Schichten aufeinander druckt. Die Flagge in Abbildung 14.15 (als Beispiel) wurde gedruckt, indem die roten, weißen



Abbildung 14.15: Mehrfarbiger Druck mit einem Extruder (selektiver Farbdruck für einzelne Schichten) unter Verwendung verschiedener Schichthöhen

und blauen Teile leicht unterschiedliche Höhen erhielten. Wenn eine Farbe fertig gedruckt ist, kann die nächste Farbe darauf gedruckt werden. Durch die Festlegung, welche Teile welcher Schichten freiliegend sind, entsteht ein mehrfarbiges Objekt. Analog dazu verwenden die iPhone-Gehäuse von Matthew Bennett (siehe Abbildung 14.16) dieselbe Methode, aber mit sehr viel mehr Farbbänderungen. Und mit durchsichtigem Faden erhält das Endprodukt noch mehr Variation. Alle diese Dinge wurden mit einem einzigen Extruder gedruckt.



*Abbildung 14.16: Diese iPhone-Gehäuse sind ein weiteres Beispiel für extremen Farbdruck für einzelne Schichten, wozu ein einziger Extruder verwendet wird.  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von Matthew Bennett)*

Eine einfachere Methode ist es, nicht die Fäden zu verbinden, sondern stattdessen eine zweistufige Methode zu verwenden, wobei der Faden abgeschnitten und neuer Faden zugeführt wird.

1. Schneiden Sie den Faden sorgfältig in der Nähe des Extruders ab, während ein Objekt ausgedruckt wird.
2. Führen Sie manuell eine andere Farbe zu, nachdem der Extruder das abgeschnittene Ende ausgedruckt hat.

Mit ein wenig Geduld und Übung werden alle möglichen interessanten Farbeffekte möglich.



Der einzige Nachteil bei dieser Methode ist, dass beim Drucken möglicherweise Faden überquillt. Bei einer normalen, durchgängigen Fadenlänge kann der Extruder den Faden nach jeder Druckbewegung ein Stück zurückziehen. Wenn er es zurückzieht, während ein Abschnitt des abgeschnittenen Fadens nicht mit dem letzten Abschnitt verbunden ist, wird der Faden nicht zurückgezogen – er quillt also ein wenig aus dem Hot-End heraus. Eine sehr schnelle Bewegung kann das Überquellen kompensieren, was aber in der ersten Zeit des privaten 3D-Drucks nicht möglich war. Im Allgemeinen war die Verbindung einzelner Fadenstücke eine bessere Lösung.

Wenn Sie eine ganze Palette unterschiedlicher Teile drucken und es so einrichten können, dass Sie beispielsweise alle 15 Minuten eine neue Farbe einlegen können (oder öfter, wenn Sie das möchten), könnten Sie die gedruckten Teile in den prächtigsten Farbkombinationen erhalten. Abbildung 14.17 zeigt dieselben 3D-Drucker-Teile, die wir für die in Kapitel 12 beschriebene Rahmenkonstruktion des Prusa i3-Druckers verwendet haben. Diese Teile wurden jedoch nach der oben beschriebenen Methode mit nur einem Extruder in Regenbogenfarben gedruckt.



Abbildung 14.17: Mehrfarbendruck durch Abschneiden und Neuzuführen eines Fadens



Wenn Sie sich nicht versiert genug fühlen, die Methode mit dem Abschneiden und Neuzuführen des Fadens einzusetzen, erlauben die meisten Software-Schnittstellen für den 3D-Druck (wie beispielsweise Pronterface), einen Druck zu unterbrechen, sodass Sie Änderungen vornehmen können. Gehen Sie einfach wie folgt vor:



1. Geben Sie das Zwischenrad des Extruders frei.
2. Ziehen Sie den bisher verwendeten Faden heraus.
3. Ersetzen Sie den Faden durch einen Faden in einer anderen Farbe.
4. Ziehen Sie das Zwischenrad des Extruders wieder fest und setzen Sie den Druck fort.

Dieser Ansatz funktioniert genau wie die Methode mit dem Abschneiden und Neuzuführen eines Fadens, nur dauert sie etwas länger.

## **Betrieb und Upgrades des Extruders**

Dieser Abschnitt enthält zahlreiche Tipps, wie Sie Ihren Extruder und Ihren 3D-Drucker möglichst auf dem neuesten Stand halten. Wenn Sie den hier beschriebenen Empfehlungen folgen, wird Ihr 3D-Druck reibungslos erfolgen und Sie vermeiden Fehldrucke und sorgen dafür, dass Ihr neuer 3D-Drucker läuft. Den Extruder in optimalem Zustand zu pflegen, ist unabdingbar. An diesem Gerät entsteht der größte Verschleiß beim Betrieb Ihres 3D-Druckers. In der folgenden Liste finden Sie verschiedene Empfehlungen und Tipps für gute Druckmethoden und für die Pflege Ihres Extruders:

- ✓ **Überprüfen Sie die Präzision Ihrer Software/Firmware:** Überprüfen Sie immer, dass Ihre Firmware und Ihre Software die korrekten Temperaturen zurückmelden. Damit ersparen Sie sich viele häufig auftretende Probleme und verlängern die Lebensdauer Ihres 3D-Druckers. Sie können die Temperatur auf unterschiedliche Arten prüfen. Eine der besten Methoden ist der Einsatz einer Thermosonde in der Düse des Hot-Ends. Wenn das nicht möglich ist, könnten Sie versuchen, einen kontaktfreien digitalen Lasertemperatursensor einzusetzen, den Sie für ungefähr 30 Euro erhalten (siehe Abbildung 14.18). Sie zeigen einfach mit dem Laser auf den Punkt, an dem Sie die Temperatur messen möchten. Dieses Gerät ist gut dafür geeignet, die Temperatur Ihres beheizten Druckbetts zu überprüfen, oder festzustellen, ob Ihre Motoren oder Ihre Antriebselektronik zu heiß werden.
- ✓ **Überprüfen Sie die Temperatur Ihres Cold-Ends:** Nachdem Sie eine Möglichkeit haben, Temperaturen zu messen, sollten Sie überprüfen, wie heiß das Cold-End (Wärmesperre) an Ihrem Hot-End wird. Wie Sie aus Kapitel 11 wissen, muss das Cold-End unter der Glastemperatur des gedruckten Materials bleiben. Dies ist vor allem für PLA kritisch, überprüfen Sie also Ihren Extruder, nachdem er eingeschaltet wurde und 20 Minuten gedruckt hat. Wenn es sich auf über 50 Grad Celsius aufheizt, sollten Sie ein Kühlgebläse anbringen. Sorgen Sie jedoch dafür, dass der Lüfter nicht über das Cold-End des Extruders hinaus auf das Hot-End oder auf das gedruckte Objekt bläst.



Einige 3D-Drucker-Bausätze werden mit einem Lüfter für die Kühlung des Cold-Ends Ihres Extruders geliefert – was im Allgemeinen ganz sinnvoll ist. Sie brauchen das nicht immer, aber es ist besser, wenn der Faden schnell aus seinem kalten Zustand auf Schmelztemperatur gebracht wird, statt einen Pfropfen angewärmtes, halbflüssiges, gummiartiges Material in Ihre Extruderdüse zu drücken.



Abbildung 14.18: Ein kontaktfreier Lasertemperatursensor kontrolliert, dass Ihr 3D-Drucker mit der richtigen Temperatur betrieben wird.

- ✓ **Reinigen Sie Ihren Faden:** Statten Sie Ihren 3D-Drucker mit einer Vorrichtung aus, die Flusen auffängt. Das hört sich komisch an, aber Staub und Flusen auf dem Faden, die in Ihr Hot-End gelangen, können sich dort ansammeln und irgendwann die Düse verstopfen. Dieser Schmutz ist auch schwer zu entfernen. Ein einfacher Schwamm, mit einem Kabelbinder um den Faden befestigt, fängt die Flusen auf und verhindert, dass sie in Ihren Extruder gelangen (siehe Abbildung 14.19).

### Ein blockiertes Hot-End oder einen Extruder reparieren

Wenn Ihr Hot-End blockiert ist oder die Fadenförderung Ihres Extruders ausfällt, erkennen Sie das meist sofort: Der Kunststoffstrom wird dünner und endet irgendwann ganz. Der Drucker versucht, weiter zu drucken, gibt aber dabei keinen Kunststoff mehr aus.

Als Erstes sollten Sie den Ausdruck anhalten und überprüfen, dass der Heizblock an Ihrem Hot-End noch die vorgesehene Temperatur hat. (Um dies möglichst sicher zu messen, verwenden Sie am besten einen kontaktlosen Temperatursensor.) Wenn die Heiztemperatur deutlich unter 160 Grad Celsius liegt, ist möglicherweise der Heizblock ausgefallen oder es gibt ein Problem mit der Verdrahtung oder der Elektronik, die den Heizer steuert.

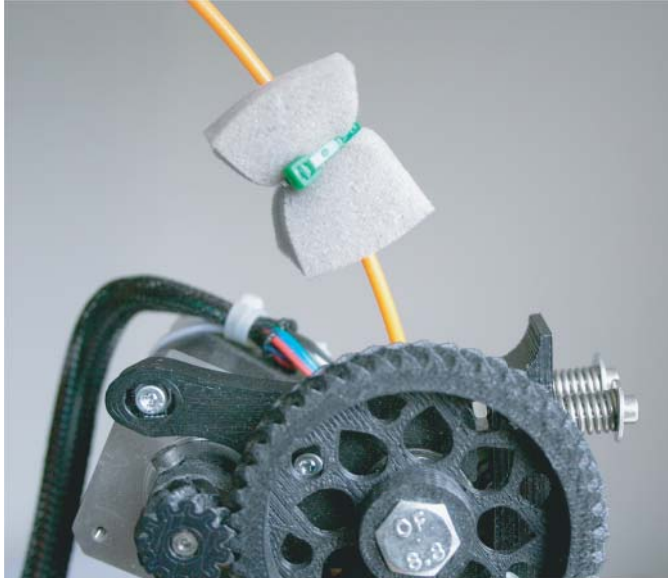


Abbildung 14.19: Ein einfacher trockener Schwamm fängt Flusen, Schmierfett und Staub auf, sodass keine Verunreinigungen in die winzige Düse Ihres Hot-Ends gelangen (und dieses verstopfen).



Leider kommt es bei 3D-Druckern für den Hausgebrauch häufig vor, dass durch die ständigen Bewegungen der Maschine die Kabel brechen. Die Verkabelung sollte immer genügend Platz haben, damit eine reibungslose Bewegung möglich ist, und genügend Durchhang, sodass nichts umgebogen oder vor- und zurückgezogen wird, wenn sich die Maschine bewegt. Die Verwendung eines silikonbeschichteten Kabels kann helfen, insbesondere mit hoher Temperaturwiderstandsfähigkeit. Immer mehr der neuen Maschinen verwenden Flachbandkabel (ein Band aus vielen parallel angeordneten Drähten). Damit entstehen weniger Probleme mit Kabelschäden.

Wenn Ihr Heizblock verstopft ist, aber die richtige Temperatur aufweist, gehen Sie ganz allgemein wie folgt vor:

1. Lassen Sie den Heizblock eingeschaltet.
2. Überprüfen Sie, ob der Fadenfördermechanismus blockiert ist, oder ob sich der Faden im Förderrad Ihres Extruders gefangen oder um dieses herumgewickelt hat.
3. Geben Sie das Zwischenradlager frei und ziehen Sie den Faden vorsichtig heraus.

Der Faden verstopft in der Regel nicht so stark, als dass er nicht herausgezogen werden könnte, solange das Hot-End auf Temperatur ist. Sehr viel häufiger zeigt der entfernte Faden Anzeichen einer zu starken Kompression an – er ist etwas dicker an der Stelle,

wo er im Hot-End geschmolzen wurde. In der Regel werden beim Herausziehen des geschmolzenen Fadens auch Verunreinigungen aus der Düse des Hot-Ends entfernt.

**4. Schneiden Sie das geschmolzene Fadenende ab und schieben Sie es von Hand wieder in das Hot-End.**

Wenn Sie den Faden weiterdrücken können und Material aus der Düse ausgegeben wird, haben Sie die Blockade repariert.

**5. Wenn kein Material ausgegeben wird, lassen Sie das Ende des Materials schmelzen und ziehen es wieder heraus.**

Wenn Sie dies mehrfach machen, sollten die meisten Blockaden aufgelöst werden. Bleibt die Blockade bestehen, gibt es zwei weitere Optionen, die extrem sorgfältig ausgeführt werden müssen:

- Schieben Sie einen Stift oder einen feinen Bohrer in die Düse, während Sie den geschmolzenen Faden herausziehen.
- Lassen Sie Ihr Hot-End abkühlen. *Nachdem es erkaltet ist*, entfernen Sie mithilfe eines chemischen Lösungsmittels (zum Beispiel Aceton) alle Ablagerungen.



Bevor Sie chemische Reinigungsmittel verwenden, vergewissern Sie sich bei Ihrem Lieferanten, ob dieser für das zuletzt im Hot-End verwendete Material, bei dem die Verstopfung aufgetreten ist, geeignet ist.

Vielleicht denken Sie jetzt, dass es sinnvoll ist, mehrere Extruder zu haben. Das ist es auch. Bei einer Blockade ist es tatsächlich so, dass Sie den Druck schnell wieder aufnehmen können, wenn Sie einen Extruder in Reserve haben. Ein weiterer Grund, sich eine Auswahl an Extrudern zu beschaffen, ist, dass Sie damit sehr viel mehr Objekttypen und mit sehr viel mehr Materialien drucken können.

## Ein Extrudersortiment beschaffen

Für den Thermoplastdruck sollten Sie zwei oder mehr Extruder für dasselbe Material, aber mit unterschiedlichen Düsengrößen und vielleicht eine Auswahl an 3 mm und 1,75 mm starken Fäden haben. Einige Materialien – insbesondere die noch nicht ausgereiften – gibt es hauptsächlich in der Größe 3 mm (weniger häufig in 1,75 mm). Faden mit 3 mm kann außerdem weniger kosten, abhängig vom Hersteller. Eine Auswahl mehrerer Düsen ist praktisch, wenn Sie verschiedene Teile unterschiedlicher Qualität drucken. Sie können immer mit einer kleineren Düse drucken, aber bei einigen Teilen dauert das Ausdrucken dann länger. Eine größere Düse kann praktisch sein, wenn Sie Grobentwürfe Ihrer Modelle erstellen wollen, oder wenn Sie vorhaben, das fertige Objekt mit Lack oder Füllstoffen zu bearbeiten.



Eine gute Allround-Düsengröße ist 0,4 mm, die ausreichend feine Details erlaubt, während gleichzeitig für die meisten Teile eine vernünftige Druckzeit erzielt wird. Sie können auch Schichthöhen von ca. 0,3 mm oder kleiner damit drucken.

Das bedeutet nicht, dass eine größere Düse keine optimale Qualität erzielen kann. Sie können relativ kleine Schichthöhen einstellen, auch wenn Sie eine größere Düse verwenden, wodurch die vertikale Qualität eines Drucks fast identisch zu derjenigen mit einer kleineren Düse wird. Es können jedoch einige feine horizontale Details verlorengehen, wenn das Modell sehr viele scharfe Kanten und Merkmale hat. Stellen Sie sich eine 3D-Druckdüse ähnlich wie eine Zahnbürste vor: Sie können eine kleinere für feinere Details und schärfere Kanten verwenden; eine größere Bürste oder Düse deckt eine größere Fläche ab, kann aber nicht die ganzen Feinheiten herausarbeiten.

Eine typische große Düse für einen privaten 3D-Drucker ist 0,6 oder 0,8 mm groß. Einige (sehr viel größere) RepRap-Drucker verwenden Düsen mit 1,2 mm, um Modelle zu erstellen, die eine Kantenlänge von einem Meter haben.



Wählen Sie die Schichthöhe nicht größer als die Düsengröße. Es ist sinnvoll, die Schichtgröße immer etwas kleiner oder manchmal auch sehr viel kleiner als die Düse zu wählen. Auf diese Weise erzielen Sie eine gute Haftung des Kunststoffs zwischen den einzelnen Schichten.

- ✓ Eine gute Allround-Düsengröße ist 0,4 mm, mit der feine Details, eine vernünftige Druckzeit für die meisten Teile und Schichthöhen von ca. 0,3 mm oder kleiner erzielt werden können.
- ✓ Eine Düsengröße von 0,6 mm gestattet den Druck von Schichten mit 0,5 mm oder kleiner und unterstützt im Allgemeinen eine sehr viel schnellere Druckzeit.



Sie können versuchen, eine Düse so klein zu wählen, wie sie die Mechanik Ihrer Maschine gerade noch zulässt. Beachten Sie jedoch, dass eine Mindestschichthöhe normalerweise ca. 0,1 mm (100 Mikron) beträgt, das ist etwa die Dicke eines Blatts Papier. Die meisten RepRap-Maschinen unterstützen auch 0,05 mm (50 Mikron) und noch kleiner, aber die Zeit für den Druck erhöht sich damit ganz wesentlich, und die Qualitätssteigerung ist schwer zu erkennen.

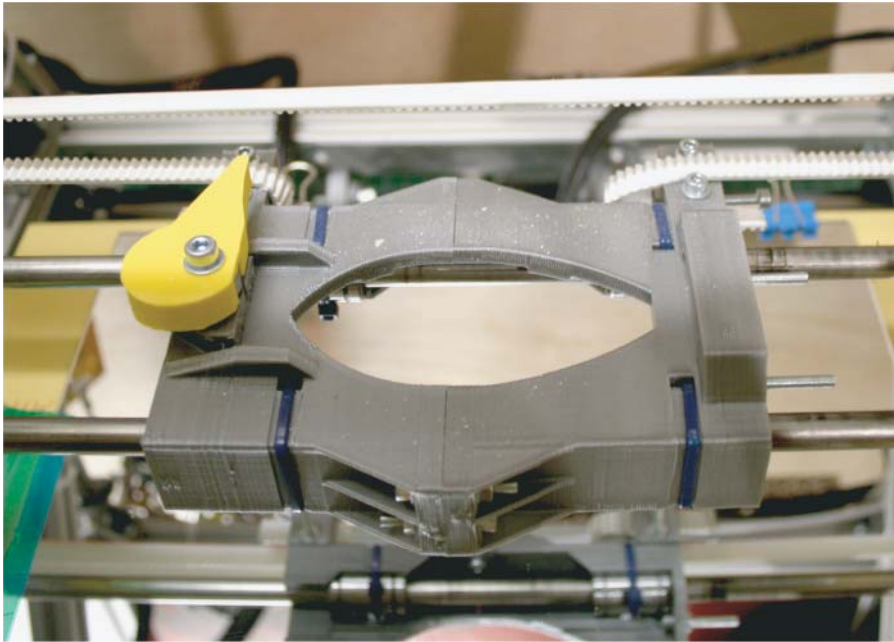
Häufig druckt man mit Schichthöhen von 0,2 mm oder 0,25 mm. Das Ergebnis ist eine recht ansehnliche Oberfläche. Wenn Sie mehr Erfahrung mit dem 3D-Druck gesammelt haben und Ihren Drucker auf eine schnellere Geschwindigkeit einstellen, werden Sie eine bessere Auflösung mit Schichthöhen von ca. 0,15 mm bis 0,1 mm erzielen.

Wenn Sie mehrere Extruder für Ihren 3D-Drucker verwenden wollen, müssen Sie diese nicht alle gleichzeitig in der Maschine montieren. Häufig ist es sehr viel sinnvoller, eine Schnellkopplung einzusetzen, die Ihnen gestattet, Extruder schnell auszutauschen.

Als die ersten RepRap-Maschinen entwickelt wurden, hatten wir große Probleme damit, mehrere Extruder zur gleichen Zeit einzusetzen. Damals waren alle Extruder gleichzeitig an dem Wagen der bewegten X-Achse montiert und mit Schrauben und Muttern fixiert.

Der Austausch der Extruder war zeitaufwändig und kompliziert, und es war nicht daran zu denken, mehrere Typen zu verwenden.

Wir haben dann einen Schnellkupplungswagen und mehrere Extrudergrundplatten für die gebräuchlichsten Hot-Ends und Pasten-Extruder entwickelt. Die Idee dabei war, das Experimentieren zu vereinfachen und Extruder schnell zu tauschen (siehe Abbildung 14.20).



*Abbildung 14.20: Ein X-Wechselwagen, der mit vielen RepRap-3D-Druckern kompatibel ist. Der gelbe Hebel links gestattet ein schnelles Einsetzen und Entfernen von Extrudern*

### **Extruder mit Lüftern kühlen**

Eine letzte Anmerkung zu den Extrudern für den 3D-Druck: Verwenden Sie Lüfter! Wir haben bereits darüber gesprochen, dass Sie einen kleinen Lüfter einsetzen sollten, um die Isolierung des kalten Endes von Ihrem Hot-End unter dem Glaspunkt Ihres Kunststoffes zu halten. Das ist sinnvoll, aber wenn Sie ultrakleine Objekte mit feinsten Details drucken oder Ihre Objekte sehr schnell drucken wollen, werden Sie schnell auf ein interessantes Problem beim Druck mit Thermoplastmaterialien stoßen: die Kontrolle der Schichttemperatur.

Wenn Sie sehr kleine Teile drucken, die eine sehr geringe Schichtoberfläche aufweisen, oder wenn Sie ein Objekt mit sehr großen Druckgeschwindigkeiten erstellen, dann werden die einzelnen Schichten innerhalb von Sekunden ausgegeben, sodass die jeweils vorherige Schicht keine Zeit zum Abkühlen hatte. Sie ist immer noch leicht geschmolzen, wenn die nächste Schicht aufgebracht wird. Mit der Strahlungswärme von der Düse und noch mehr heißem Kunststoff kann das Modell ganz einfach zu einem unansehnlichen Klumpen werden, was bestimmt nicht in Ihrem Sinne ist. Sie können die Geschwindigkeit verringern, aber damit



ist das Problem womöglich nicht gelöst, zumal Sie dann noch länger auf Ihre gedruckten Objekte warten müssen. Hier kann ein kontrollierter Lüfter einen wesentlichen Unterschied ausmachen.

Der Lüfter für die Kühlung eines gedruckten Objekts ist in der Regel 80 mm breit. Er wird über die Elektronik gesteuert: In Ihrem von Slic3r erzeugten G-Code können Sie angeben, wie schnell ein Lüfter für die Kühlung laufen soll, und wann er ein- oder ausgeschaltet werden soll. Mit einem Lüfter kann Slic3r den Druck immer noch bei voller Geschwindigkeit fahren – selbst wenn Sie ein Modell mit feinsten Details erstellen. Ohne Lüfter müsste Slic3r den G-Code anweisen, den Drucker zu verlangsamen, um eine natürliche Abkühlung des Kunststoffs zuzulassen, bevor weiterer Kunststoff hinzugefügt wird. Wie Sie sich vorstellen können, kann es sehr kompliziert sein, feine Strukturen ohne Lüfter aufzubauen.

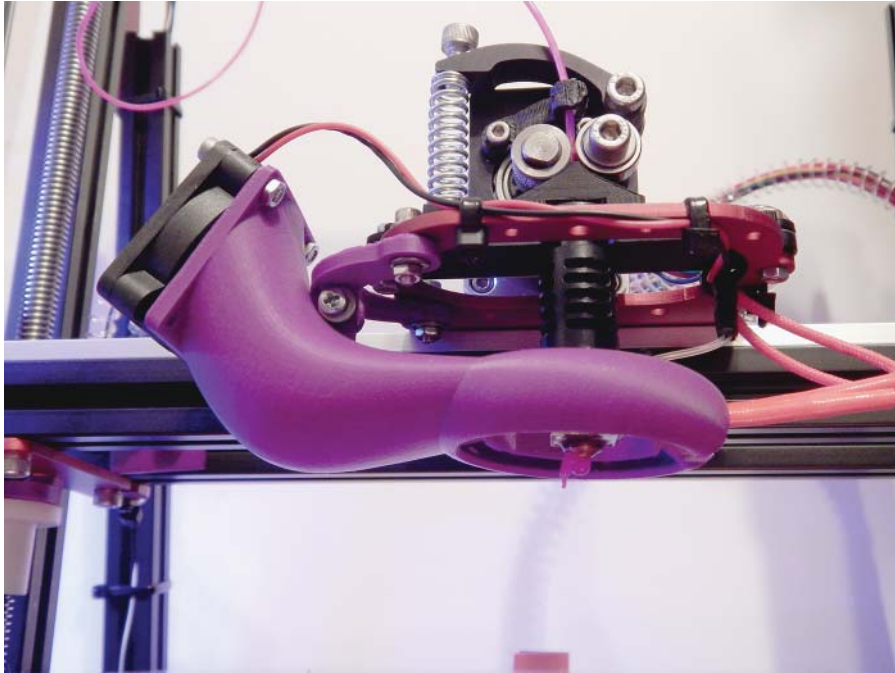
Wir werden in Kapitel 15 über die Lüftereinstellung mit Slic3r sprechen. Hier wollten wir nur auf die Möglichkeit hinweisen, mit einem Lüfter *Brücken* aus extrudiertem Material anzulegen. Das ist bei vielen 3D-gedruckten Objekten sehr wichtig. Brücken werden über Lücken gespannt, einfach in der Luft. Wenn Sie Kunststoff extrudieren, ohne dass sich etwas darunter befindet, sackt das extrudierte Material unweigerlich durch und irgendetwas bricht zusammen. Sie können den Faden auch ohne Lüfter zu einer Brücke verarbeiten, aber ein leichter Durchhang wird nie zu vermeiden sein. Mit einem Lüfter, der den Kunststoff abkühlt, sobald er extrudiert wird, können Sie eine solide Brücke und optisch einwandfreie Ergebnisse schaffen (siehe Abbildung 14.21).



*Abbildung 14.21: Hier müssen mit Fäden Brücken gespannt werden. Mit einer guten Kühlung und ein paar abwechselnd gedruckten Schichten wird dies zu einer soliden Oberfläche, auf die wieder gedruckt werden kann*



Sehr wichtig bei der Kühlung mit einem Lüfter ist, diesen so zu montieren, dass er den oberen Teil des gedruckten Teils kühlt. Wenn Sie das Heizbett kühlen, wird sich Ihr Teil irgendwann während des Drucks von der Druckplatte lösen. Wenn Sie versehentlich das Hot-End kühlen, verstopft womöglich Ihr Extruder. Häufig verwenden Lüfter 3D-gedruckte Kühlkanäle, die beim Ausdrucken einen Luftstrom auf das gedruckte Teil leiten. Damit wird eine unerwünschte Kühlung des Heizbetts und des Hot-Ends vermieden (siehe Abbildung 14.22).



*Abbildung 14.22: Ein 3D-gedruckter Kanal leitet Luft auf das Druckteil und sorgt dafür, dass nicht versehentlich der Heizer für das Hot-End gekühlt wird*



Für den Ausdruck von ABS-Material ist größtenteils davon abzuraten, einen Lüfter für die Kühlung zu verwenden. Der Lüfter bewirkt, dass die Kanten des Teils zu schnell abkühlen und sich nach oben biegen. Und die darauffolgende Schicht kann noch schlimmer aussehen. Irgendwann ist das Teil so deformiert und verbogen, dass der Druckkopf es womöglich von der Druckplatte drückt. Für PLA gilt genau das Gegenteil: PLA mag Lüfter. ABS nicht.



## ***In diesem Kapitel***

- ▶ Software für das 3D-Design und Modellressourcen finden
- ▶ Modelle aufbereiten, ein Slicing dafür durchführen und die richtigen Einstellungen finden
- ▶ Ihren 3D-Drucker kalibrieren
- ▶ Ihre ersten Objekte ausdrucken

---

**D**amit sind wir in der letzten Phase der Einstellung Ihrer RepRap-Maschine angelangt: der Bearbeitung und Kalibrierung von 3D-Modellen. In diesem Kapitel geht es um die besten Methoden, Modelle auszudrucken (samt Verwendung von Stützmaterial). Wir betrachten verschiedene Quellen für 3D-Modelle und einige der gebräuchlicheren Software-Pakete für die 3D-Modellierung, mit denen Sie Designs erstellen können. Außerdem erklären wir genauer, wie Modelldateien vorbereitet werden und wie mit Slic3r G-Code für die Ausgabe erstellt wird, den Sie direkt auf Ihrem RepRap-3D-Drucker einsetzen können. Bevor es dann um die Feinheiten beim Ausdruck von Teilen geht, kalibrieren wir die Maschine und bereiten sie für den Ausdruck Ihres ersten Objekts vor. Und schließlich werden wir noch einige allgemeine 3D-Objekte betrachten und zeigen, mit welchen Einstellungen Sie die besten Ergebnisse erzielen.

## ***Software für das 3D-Design und Modellressourcen***

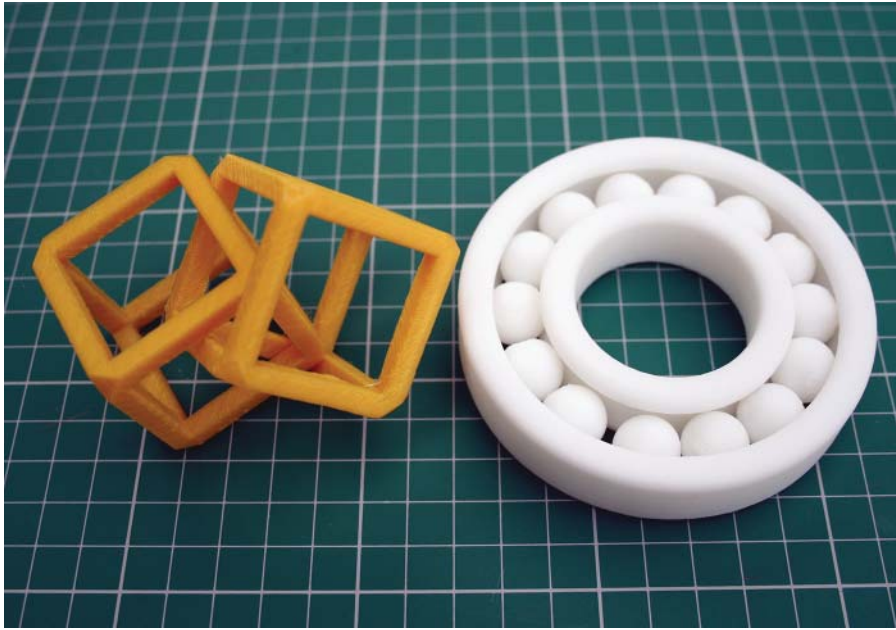
Der gesamte 3D-Druckprozess beginnt mit einem Modell – aber wie werden diese Modelle erstellt? Und woher erhalten Sie digitale Modelle von Objekten, die Sie sofort ausdrucken können? Und was ist für den 3D-Druck weniger gut geeignet?

Objekte, die für den privaten 3D-Druck vorgesehen sind, sind tatsächlich fertige Modelle. Die Designer dieser Modelle berücksichtigen, dass ihre Modelle 3D-gedruckt werden, bevor irgendeine Modellierung stattfindet. Der Anwender kann sich Dinge besser vorstellen und eigene Modelle anfertigen, wenn er sich anhand von Beispielen genauer vorstellen kann, worum es geht.

Ein privater 3D-Drucker kann nicht wirklich alles drucken. Diese praktische Einschränkung frustriert Benutzer, die davon träumen, dass sie sich einen Drucker bauen und dann sofort hochqualitative Teile für die Produktentwicklung, den Modellbau oder als Ersatz für bisher manuell oder in der herkömmlichen Fertigung erzeugte Teile herstellen können.

Aber 3D-Drucker sind gut darin, Objekte zu erzeugen, die mit anderen Fertigungstechniken *nicht* hergestellt werden können. Abbildung 15.1 zeigt zwei Beispiele dafür. Die meisten Benutzer müssen jedoch keine so komplizierten Modelle erstellen, zumindest nicht am Anfang.

Nehmen wir beispielsweise an, Sie wollen ein Modell einer Person für Ihre Modelleisenbahn ausdrucken, die in sitzender Position die beiden Arme ausgestreckt hat (siehe Abbildung 15.2).



*Abbildung 15.1: Zwei 3D-gedruckte Objekte, die mit Spritzgussmaschinen nicht möglich wären*

Software-Pakete wie Poser oder Google Sketchup machen diese Modellierung ganz einfach. Wenn Sie das Modell anschließend an einen 3D-Druck-Shop senden, wo ein professioneller SLS-3D-Drucker (Selective Laser Sintering) eingesetzt wird, wird es problemlos ausgedruckt. Wenn Sie dasselbe zuhause auf Ihrem privaten 3D-Drucker probieren, kann das eine wahre Herausforderung sein – insbesondere, wenn dies Ihr erstes Projekt ist.

Das größte Problem für FFF-Drucker (Fused Filemant Fabrication) wie den RepRap-Druckern ist, dass sie nicht einfach in die Luft extrudieren können. Das Objekt muss beim Druckvorgang immer gestützt werden. Jede neue Schicht braucht eine darunterliegende Schicht, auf der sie aufbauen kann. Beim Ausdruck des Modells einer sitzenden Person wären die Füße und die Unterschenkel relativ unkompliziert zu drucken, aber der 90°-Überhang der Oberschenkel und die ausgestreckten Arme wären ein echtes Problem: Der extrudierte Kunststoff hat keine Unterlage, auf der er aufliegen könnte. Weil er einfach in die Luft ausgegeben wird, fällt das Ganze zusammen wie ein Berg Spaghetti.

Ein professioneller SLS-3D-Drucker arbeitet anders. Er baut Objekte unter Verwendung von feinem Nylon-Pulver auf. Ein Laser schmilzt eine Nylonschicht an bestimmten Stellen, um damit das Objekt nachzuformen. Anschließend wird eine weitere vollständige Schicht feines Pulver über der Oberfläche aufgetragen und der Prozess wird wiederholt. Der wichtigste Unterschied dabei ist, dass das gesamte nicht geschmolzene Pulver die geschmolzenen Teile stützt. Nachdem das Modell abgekühlt ist, wird das überschüssige Pulver weggebürstet. Das fertige Modell kann beliebige Form und beliebige Komplexität annehmen. Mit den 3D-Druckern für den Privatanwender ist das nicht möglich, zumindest heute noch nicht.

Um dieses Problem aus der Welt zu schaffen, können wir eine Stützstruktur verwenden, die als eine feine Materialsäule vom Druckbett aus aufgebaut wird (oder von dem Druckteil

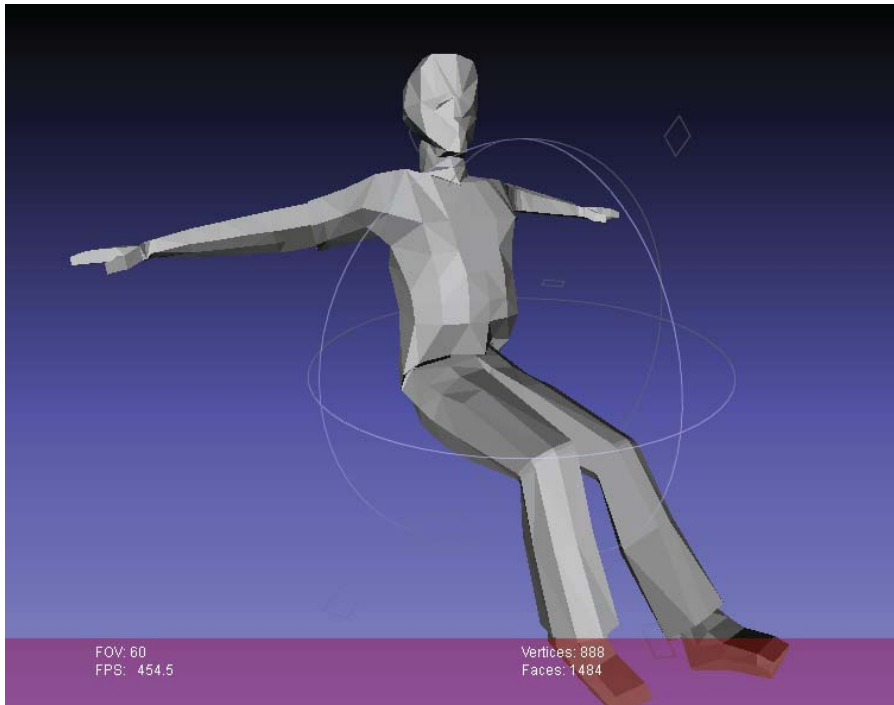


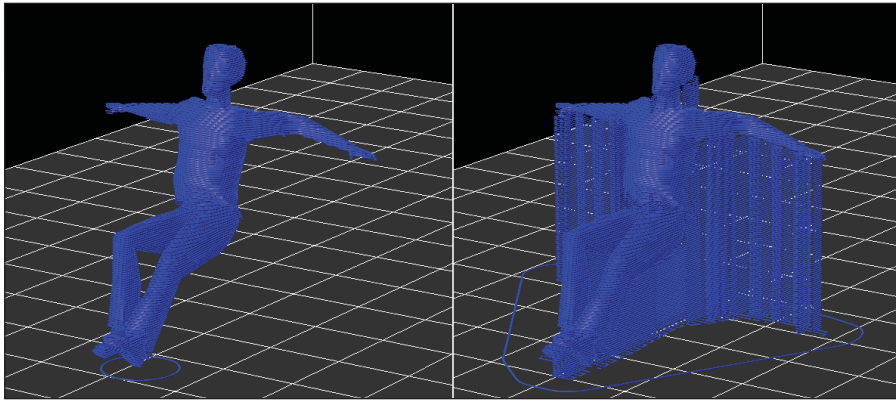
Abbildung 15.2: Eine Person in einer speziellen Position ist für einen privaten 3D-Drucker schwierig zu drucken. Das Modell hat Überhänge, an denen dem Druckmaterial einfach die Abstützung fehlt.

selbst), um überhängende Teile zu stützen. Unsere Slic3r-Software (die im nächsten Abschnitt beschrieben wird) erkennt, wo eine solche Stütze eingefügt werden muss. Sie können sogar einen zweiten Extruder nutzen, um für die Stützen ein anderes Material zu verwenden.



Normalerweise verwenden 3D-Drucker für den Privatanwender dasselbe Material für das Modell wie für die Stützelemente. Das gesamte überflüssige Material muss abgeschnitten werden und das Modell muss noch ein wenig gesäubert werden, nachdem der Druckvorgang abgeschlossen ist (siehe Abbildung 15.3). Die Slic3r-Software für die Modellverarbeitung kann automatisch Stützmaterial einbauen, wo es benötigt wird. Dieser Ansatz funktioniert prächtig, aber denken Sie daran, dass das Stützmaterial nur vorübergehend benötigt wird. Nach dem Ausdruck muss es entfernt werden. Dabei können deutliche Spuren zurückbleiben. Wenn die gedruckten Teile filigran sind, kann es schwierig sein, die Stützmaterialien manuell zu entfernen (siehe Abbildung 15.4 und Abbildung 15.5). Wenn Sie einen zweiten Extruder einsetzen, um ein Material für die Stützen zu verwenden, das besser zu bearbeiten ist, wie beispielsweise ein Thermoplast wie PVA, kann das Objekt »gesäubert« werden, indem es einfach in warmes Wasser gelegt wird. Das PVA löst sich auf und das fertige Modell wird freigelegt. Lösliche Stützmaterialien sind wahrscheinlich eine sinnvolle Ergänzung zukünftiger 3D-Drucker für den Privatanwender.





Ausgangsmodell

Ausgangsmodell mit zusätzlichem  
Stützmaterial

Abbildung 15.3: Das nicht druckbare Modell (links) und dasselbe Modell mit Stützmaterial, das nach dem Druck entfernt werden kann (rechts)

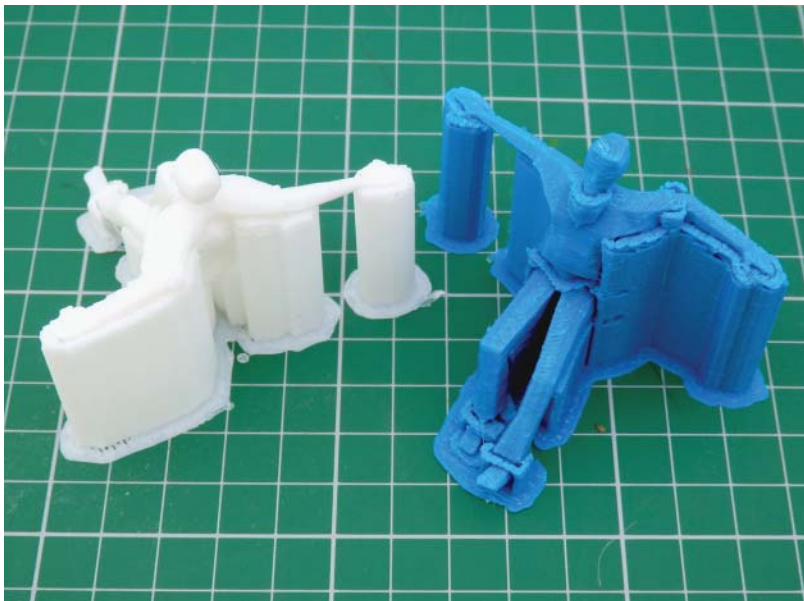
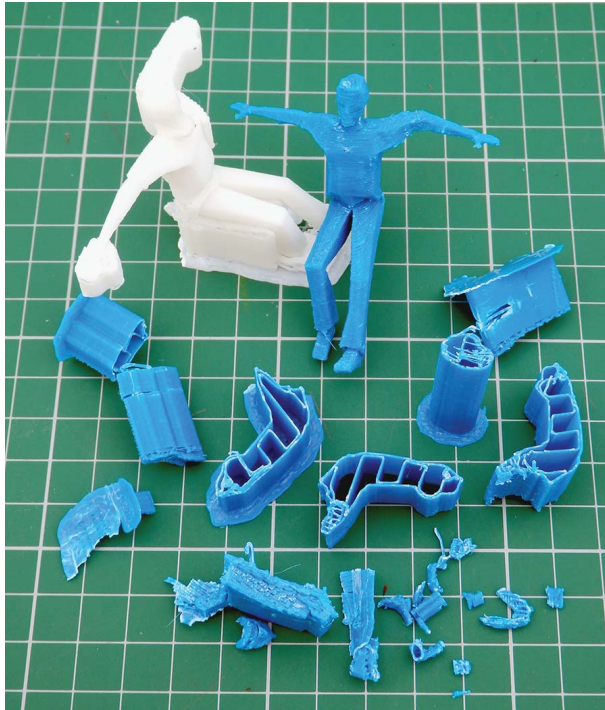


Abbildung 15.4: Seien Sie vorsichtig beim Entfernen des Stützmaterials. Kleine, filigrane Teile können beschädigt oder abgebrochen werden.

Wir sparen uns häufig die Verwendung von Stützmaterial (oder brauchen nur sehr wenig davon), wenn wir das Modell in netfabd drehen, bevor wir es drucken (einen Überblick über netfabd finden Sie in Kapitel 11). Wenn wir beispielsweise das Modell der sitzenden Person so



*Abbildung 15.5: Diese Stützstruktur ist fast hohl und kann einfach mit einer spitzen Pinzette entfernt werden. Für die weitere Säuberung benötigen Sie ein Skalpell oder eine kleine Feile.*

drehen, dass der Rücken und die Arme auf der Druckplatte aufliegen, brauchen wir womöglich überhaupt kein Stützmaterial (siehe Abbildung 15.6).

Darum bieten die meisten Websites für den 3D-Druck Modelle für den privaten Anwender an. Diese Modelle von Personen stehen meistens aufrecht, mit den Armen an den Körperseiten oder mit den Händen an den Oberschenkeln. In jedem Fall wird kein zusätzliches Stützmaterial benötigt, der Druck ist also auch auf einem 3D-Drucker für den Hausgebrauch möglich. Würden komplexere Posen veröffentlicht, hätten die meisten Anwender Probleme beim Ausdruck aufgrund des schichtweisen Aufbaus. Wenn Sie also ein Modell einer sitzenden Person brauchen, müssen Sie sich mit dem Gedanken anfreunden, dass Sie Stützmaterial brauchen (wie in Abbildung 15.4 und Abbildung 15.5 gezeigt).



Eine weitere Möglichkeit, Stützen zu vermeiden, ist die Unterteilung eines komplexen Modells in zwei oder mehr Teile, für die jeweils weniger (oder überhaupt kein) Stützmaterial erforderlich ist. Nachdem Sie diese Teile ausgedruckt haben, können Sie sie mit Kleber verbinden.

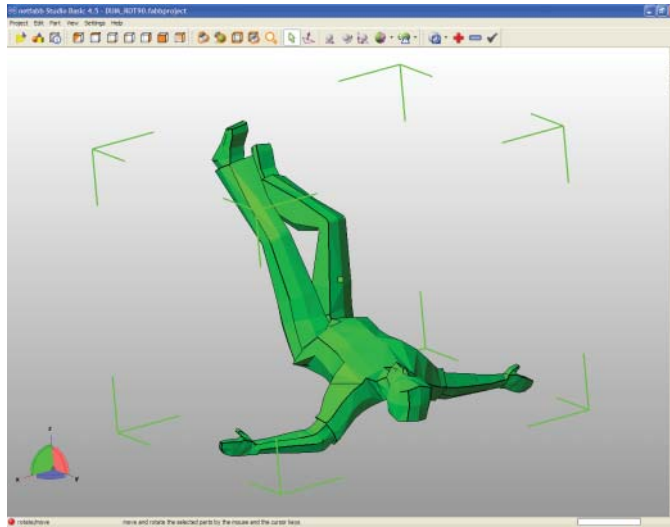


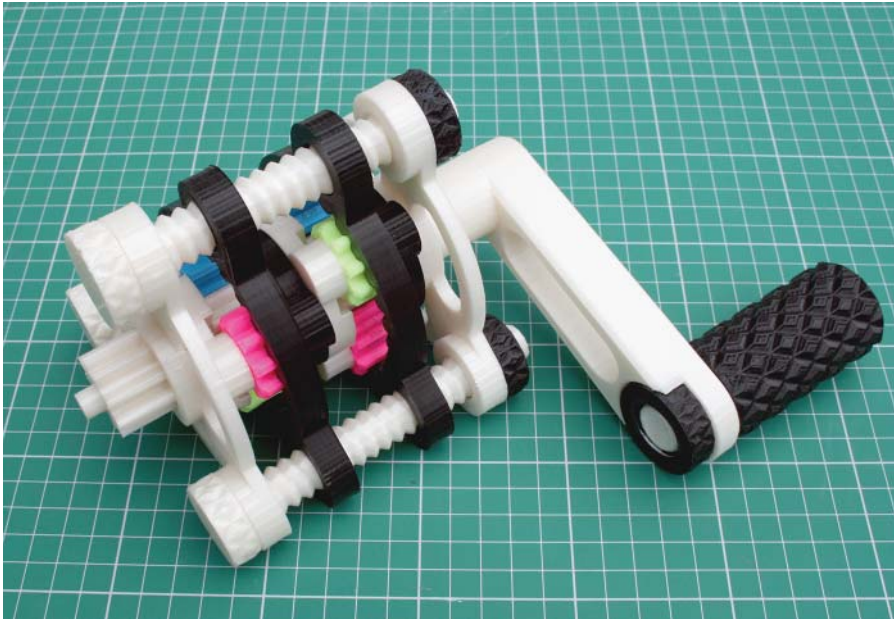
Abbildung 15.6: Durch die Drehung von Modellen in netfabb können sie unter Umständen einfacher ausgedruckt werden.

Komplizierte Objekte werden häufig besser in mehrere Teile unterteilt. Alle Teile werden auf der Druckplatte ausgedruckt und später wieder zu komplexen, funktionierenden Objekten zusammengesetzt. Das in Abbildung 15.7 gezeigte Umlaufrädergetriebe beispielsweise ist auch für einen professionellen 3D-Drucker eine Herausforderung, wenn es in einem Stück gedruckt werden soll, ohne dass eine manuelle Montage erforderlich ist. Aber bleiben Sie dran – wir kommen dem Ziel täglich näher.

### Design-Software

Es gibt zahlreiche Software-Pakete für das Design von 3D-Modellen. Viele davon werden als Open Source bereitgestellt und können kostenlos heruntergeladen werden. Sie enthalten normalerweise Exportfunktionen für das Modellformat .STL, das von RepRap-3D-Druckern verwendet wird.

Eine sehr beliebte Option bei RepRap-Entwicklern ist OpenSCAD ([www.openscad.org](http://www.openscad.org)). Dieses als Open Source bereitgestellte Programm für die 3D-Modellierung bringt phänomenal viele Beispiele, Bibliotheken und Ressourcen mit. Es unterstützt eine *parametrische Modellierung*, wobei die Größe, die Form und die Funktion von Designs fast beliebig geändert werden können, indem einfach nur Parameterwerte geändert werden. Der Nachteil bei dieser Software ist, dass sie sehr kompliziert ist. Wenn Sie keine Programmierkenntnisse besitzen oder fundiertes Wissen über die 3D-Geometrie mitbringen, werden Sie schnell Probleme damit haben (siehe Abbildung 15.8).



*Abbildung 15.7: Eine mehrstufiges Umlaufrädergetriebe. Auf einem privaten 3D-Drucker können alle Teile einzeln ausgedruckt werden, die jedoch später montiert werden müssen.*

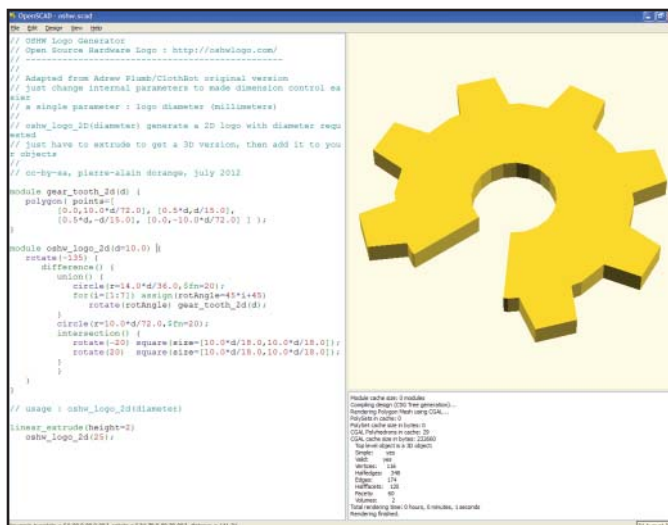


Abbildung 15.8: Der parametrische Charakter von OpenSCAD gestattet mit ein paar kleinen Änderungen im Code viele verschiedene physische Darstellungen.

Ein weiteres gebräuchliches Paket ist Google Sketchup. Dieses visuelle Modellierwerkzeug ist praktisch, wenn Sie mit Ihren eigenen Designs experimentieren oder vorhandene 3D-Modelle abändern wollen. Sie können es unter <http://sketchup-make.softonic.de> herunterladen.



Sie können fast jedes Programm für die 3D-Modellierung nutzen. Viele davon werden auch als cloudbasierte Anwendungen angeboten, die benutzerdefinierte 3D-Modelle erstellen (oder es Ihnen ermöglichen, sie ganz einfach anzufertigen).

Und es gibt noch sehr viel mehr Software für den privaten Anwender im Bereich des 3D-Drucks, unter anderem Tinkercad, 3DTin, Meshmixer und die ganzen Autodesk123-Programme. Sie sind alle benutzerfreundlich und gestatten die 3D-Modellierung von Objekten für den 3D-Druck zuhause ebenso wie für gewerbliche Anwendungen.

Profi-Tools wie Solidworks sind für ein vollständiges Design und die funktionale Analyse von Produkten vorgesehen. Pakete wie Rhinoceros (das häufig von Schmuckdesignern und 3D-Künstlern verwendet wird) bieten Optionen für fast jeden Einsatz eines 3D-Druckers.

Für einen 3D-Drucker brauchen Sie das Ausgabeformat .STL. Dieses gebräuchliche Dateiformat wird normalerweise als Exportoption angeboten. Für einige Pakete brauchen Sie ein Plug-in.

Wenn Sie bereits eine STL-Modelldatei aus einem Objektverzeichnis geladen haben oder eine solche aus Ihrem Programm für die 3D-Modellierung exportiert haben, nutzen Sie den nächsten Abschnitt, um Ihr Modell zu überprüfen und sicherzustellen, dass es für Ihre Software funktioniert.

### Überprüfung von Modellen mit netfabb

Wenn Sie eine STL-Modelldatei haben, müssen Sie das Modell *überprüfen*, bevor Sie es drucken können. Softwareprogramme und Slicing-Tools für den 3D-Druck betrachten alle 3D-Modelle, auch Festkörper, als Menge von Dreiecken, die verbunden sind, um eine hohle *Mesh*-Oberfläche zu bilden. Die Dreiecke in Ihrem Modell dürfen sich nicht schneiden – dadurch entsteht ein *ungültiges Mesh*, das beim Ausdruck Probleme machen dürfte.

Sie sollten deshalb immer überprüfen, ob Ihr heruntergeladenes oder exportiertes Modell ein *gültiges Mesh* darstellt, das heißt, ob es eine ordnungsgemäße Ausrichtung für den 3D-Druck besitzt und ob es die Größe hat, die Sie erwarten und benötigen. Für diese Vorabprüfung ist netfabb Basic ideal geeignet. Es kennzeichnet Probleme mit einem Ausrufezeichen und zeigt Ihnen die Ausrichtung auf dem Bildschirm an. Hier können Sie das Modell reparieren, vergrößern oder verkleinern oder neu orientieren, wie es für den Export und den 3D-Druck erforderlich ist (siehe Abbildung 15.9).

Wenn Mesh-Fehler vorliegen, können Sie mit netfabb Reparaturen vornehmen. Nach der Drehung und Skalierung des Modells nach Bedarf klicken Sie auf die +-Schaltfläche, um eine Reparatur zu versuchen. Anschließend wählen Sie STANDARD REPAIR (Standardreparatur) aus und klicken auf APPLY REPAIR (Reparatur übernehmen), um ein neues Modell zu erhalten, das Sie für den 3D-Druck exportieren können (siehe Abbildung 15.10).



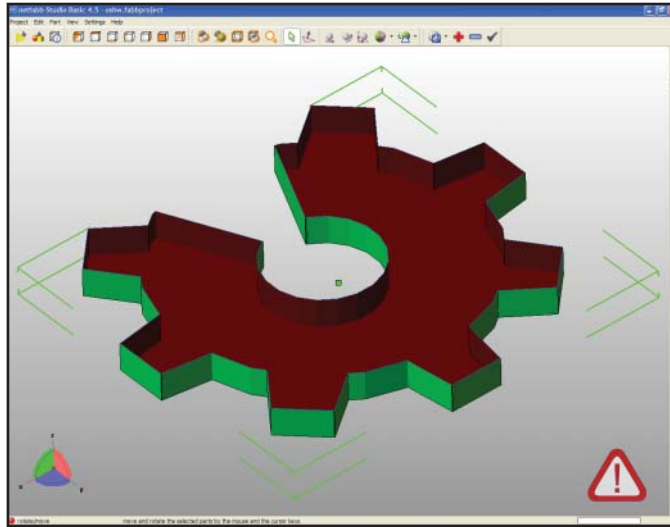


Abbildung 15.9: netfabb kennzeichnet Probleme an Ihrem Modell mit einem Ausrufezeichen.

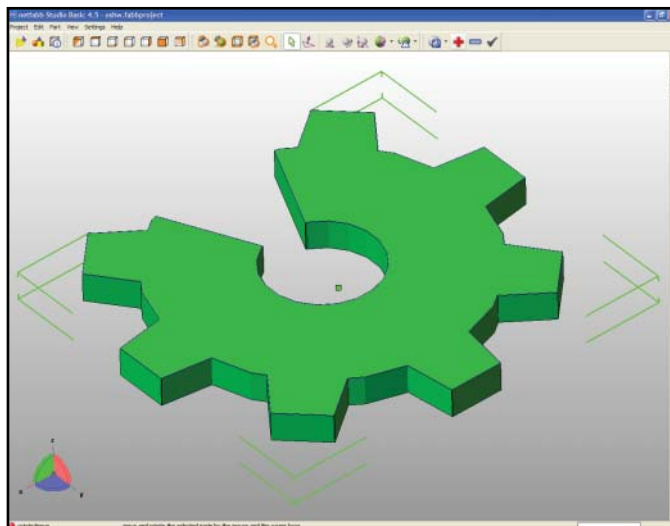


Abbildung 15.10: Hier hat netfabb erkannt, dass das Modell keinen Festkörper darstellt. Nach der Reparatur kann das Festkörpermodell 3D-gedruckt werden.

## Slic3r

Slic3r ist ein Slicing-Programm für den 3D-Druck, das wir bereits in Kapitel 11 angesprochen haben. Es hilft, 3D-Modelle für den Druck aufzubereiten. Die Slic3r-Software kann für PC, Mac und Linux unter [www.slic3r.org](http://www.slic3r.org) heruntergeladen werden. Bevor Sie diesen Abschnitt lesen, sollten Sie Slic3r herunterladen und auf Ihrem Computer installieren.



## Slic3r konfigurieren

Nachdem Sie Slic3r erfolgreich installiert haben, müssen Sie es konfigurieren. Bevor ein Objekt für den Ausdruck in Schichten aufgespalten werden kann, muss Slic3r einige wichtige Einstellungen für Ihren spezifischen 3D-Drucker erfahren. Sie geben diese Einstellungen in einen Konfigurationsassistenten ein, der beim ersten Start von Slic3r angezeigt wird.



Machen Sie sich keine Gedanken – alle diese Einstellungen können später geändert werden, wenn das notwendig werden sollte. Hier geben Sie einfach so viele Details ein, wie Sie können. Sie können später auch andere Konfigurationen speichern. Diese Möglichkeit ist praktisch, wenn Sie mehrere verschiedene Drucker betreiben, Upgrades oder verschiedene Materialtypen testen wollen.

Für die Konfiguration von Slic3r gehen Sie wie folgt vor:

### 1. Wählen Sie im Assistenten den G-Code -Stil aus, den Sie für die auf Ihrem RepRap-3D-Drucker ausgeführte Firmware verwenden wollen.

Dies ist in der Regel REPRAP (MARLIN/SPRINTER/REPETIER) (siehe Abbildung 15.11).

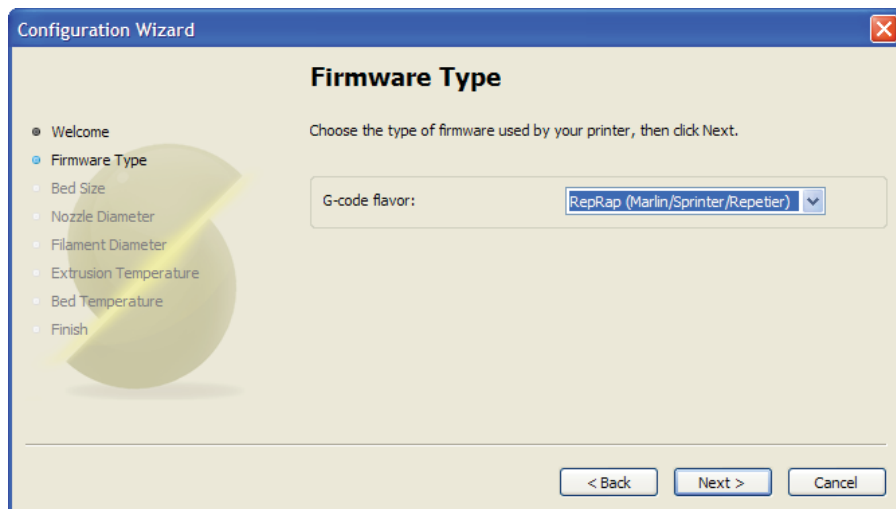


Abbildung 15.11: Auswahl des G-Codes für Ihre Firmware

### 2. Geben Sie die Größe des Druckbetts für Ihren Drucker ein.

- Für einen RepRap mit Heizbett aus PCB im Stil des Prusa (wie im vorigen Kapitel beschrieben) geben Sie 200 mm x 200 mm ein.
- Ein Delta-Drucker hat einen runderen Druckbereich, was beim Druck von Objekten berücksichtigt werden muss. Sie können die Größe als X- und Y-Koordinaten eingeben.

### 3. Geben Sie die Größe der Ausgabedüse am Hot-End Ihres 3D-Druckers an.

Geben Sie die Größe Ihrer Extruderdüse an. Übliche Größen sind 0,5 mm, 0,4 mm und 0,35 mm. Slic3r nutzt diese Information, um den Platz zu berechnen, der für die Ausgabe der einzelnen Schichten erforderlich ist, sodass jede Schicht sicher an der darunterliegenden Schicht haften kann. Diese Einstellung dient als Richtwert für Slic3r. Die Einstellung von Breite und Höhe des Extrusionspfades ist ein separater und unabhängiger Teil des Kalibrierungsvorgangs.



Die tatsächlich extrudierte Breite der Ausgabe hängt von vielen winzigen Details des Hot-End-Designs ab. Häufig hat man eine gewisse *Extrudatquellung*: Der ausgegebene Faden dehnt sich aus, nachdem er die Düse verlassen hat. Aus diesem Grund ist eine Druckkalibrierung so wichtig, um zu verhindern, dass die extrudierten Kunststoffschichten zu nahe beieinander oder zu weit voneinander ausgegeben werden, sodass Ihre 3D-Modelle gut aussehen und ordnungsgemäß funktionieren. Wir werden später in diesem Kapitel zeigen, wie Sie mit der Extrudatquellung umgehen.

### 4. Geben Sie den Fadendurchmesser an.

Messen Sie den Durchmesser Ihres Fadens, ermitteln Sie den besten Durchschnitt und geben Sie das Ergebnis in Slic3r ein. Lesen Sie zuvor aber unbedingt den Kasten »Überprüfen Sie Ihren Faden sorgfältig«.

#### Überprüfen Sie Ihren Faden sorgfältig

Ein gleichmäßiger Fadendurchmesser, der mit rundem, nicht ovalem Querschnitt extrudiert wird, ist maßgeblich für einen erfolgreichen 3D-Druck. Slic3r muss die Größe Ihres Eingabefadens kennen, sodass es das Kunststoffvolumen berechnen kann, das es für die Ausgabe am Hot-End vorgibt, während sich der Druckkopf am Objekt bewegt. Wenn diese Einstellung nicht stimmt – oder sich Ihr Material während des Ausdrucks ändert –, haben Sie Probleme:

- Sie laufen Gefahr, dass zu viel Material extrudiert wird. Dadurch kann Ihr Druckkopf verstopfen oder verrutschen und Ihr Objekt ruinieren.
- Genauso schlimm ist es, wenn zu wenig Material extrudiert wird. Damit erhalten Sie einen schwachen Ausdruck, die Schichten können sich ablösen oder das Objekt wird einfach richtig hässlich.

Ein guter Faden sollte einen runden Querschnitt aufweisen, mit einer Abweichung von nicht mehr als 0,1 mm. Ein ovaler Faden kann zu einer Katastrophe führen – er ändert sein Volumen in Ihrem Hot-End abhängig davon, wie das Förderrad des Extruders ihn greifen kann.

Das Ergebnis ist ein einziges Durcheinander. Wenn Sie feststellen, dass Ihr Faden einen ovalen Querschnitt aufweist, beschweren Sie sich beim Hersteller und geben den Faden zurück.

Am besten ermitteln Sie die durchschnittliche Größe Ihres Fadens, indem Sie auf ein paar Metern Material an zehn Punkten mit einem Mikrometer messen. Überprüfen Sie, dass der Faden rund ist, indem Sie den Mikrometer am selben Punkt drehen. Addieren Sie die Messungen und dividieren Sie die Summe durch 10. Der Mittelwert sollte eine Toleranz von etwa 0,1 mm Abweichung aufweisen, wenn Sie einen qualitativ guten Faden haben.

Sie können natürlich auch den Daten vertrauen, die Ihnen Ihr Hersteller bereitgestellt hat, aber es ist wirklich sinnvoll, sich die Zeit für eine Messung der Materialgröße zu nehmen, insbesondere wenn Sie mehrere Hersteller oder verschiedene Materialtypen nutzen. Beachten Sie, dass die tatsächliche Größe von 3-mm-Faden häufig 2,85 mm ist. Das ist normal. Auf diese Weise kann der Faden durch die Röhren geleitet werden, die in Hot-Ends und Extrudern mit 3 mm Durchmesser verwendet werden.



Neulinge im 3D-Druck ändern, wenn sie an ihren Druckobjekten zu wenig oder zu viel Material feststellen, häufig die Einstellung für den Fadendurchmesser, um das Materialvolumen anzupassen. Das kann funktionieren, aber Sie sollten es besser nicht so machen. Eine fehlerhafte Extrusion deutet häufig auf ein größeres Problem mit der Extruderkalibrierung oder Maschineneinstellung hin. Daraus ergibt sich häufig eine schlechte Druckqualität. Die Ausgabe von zu viel Material erzeugt schlechte Ergebnisse, die Ausgabe von zu wenig Material verursacht Löcher und Öffnungen. Und eine nur geschätzte Änderung der Einstellungen führt zu einer unpräzisen Berechnung der Druckzeit und des verwendeten Materials. Verwenden Sie einen präzisen Messwert für den Fadendurchmesser und passen Sie diesen Wert nicht an, um das Volumen des extrudierten Kunststoffs zu manipulieren.

### 5. Fahren Sie fort mit den Eingaben für den Konfigurationsassistenten von Slic3r. Geben Sie Ihre Extrusionstemperaturen an, ebenso wie die Temperatureinstellungen für das Heizbett.

Die Extrusionstemperatur eines Thermoplasts beim 3D-Druck muss so hoch sein, dass Ihr Extruder das Material gleichmäßig in das Hot-End drücken kann, ohne dass sich Staus ergeben, aber nicht so hoch, dass der Kunststoff zu flüssig wird und zusammenbricht und raucht. Wir haben bereits beschrieben, welche Extrusionstemperaturen Sie für die gebräuchlichsten Kunststoffe in Ihrem 3D-Drucker verwenden sollten. Für PLA liegt die Temperatur bei ca. 200 Grad Celsius, für ABS bei etwa 240 Grad Celsius.



Wenn Sie sehr viel schneller als »normal« drucken, müssen die Drucktemperaturen normalerweise erhöht werden, und auch wenn Sie sehr kleine, detaillierte Objekte drucken. (Weitere Informationen über Extrusionstemperaturen finden Sie später in diesem Kapitel.)

### 6. Wenn Ihr RepRap-3D-Drucker ein Heizbett besitzt, geben Sie einen Temperaturwert für das Material ein, das Sie drucken wollen.

Auch hier müssen Sie sich keine Gedanken machen, wenn Sie vorhaben, mit unterschiedlichen Materialien zu drucken. Sie können in Slic3r mehrere Konfigurationen speichern. Verwenden Sie als Richtwert 60 Grad Celsius für PLA und 110 Grad Celsius für ABS. Wenn Sie ohne Heizbett drucken wollen, behalten Sie diesen Wert mit der Einstellung 0 bei.



Fast jeder RepRap-Drucker muss auf bestimmte Drucktemperaturen eingestellt werden. Sie können Vorschläge von anderen Anwendern als Anhaltswerte verwenden, aber abhängig von der genauen Positionierung des Temperatursensors und kleinen Abweichungen in der Einstellung von Elektronik und Firmware können sich völlig andere Werte ergeben.

## Modellverarbeitung mit Slic3r

Nachdem Sie Slic3r installiert und konfiguriert haben, können Sie Ihr Modell damit verarbeiten. Slic3r erzeugt aus Ihrem Modell eine G-Code-Datei für die Druckausgabe, mit der Sie unmittelbar zu drucken anfangen können.

**Hinweis:** Wir haben Slic3r für dieses Beispiel im Simple Mode verwendet. Nachdem Sie sich mit Ihrem 3D-Drucker vertraut gemacht haben und wissen, wie er sich verhält, können Sie in den Expert Mode wechseln, der mehr Einstellungen und Optionen bietet. Wir werden einige der Expertenfunktionen später in diesem Kapitel noch ansprechen.



Software-Tools wie Slic3r, die als Open Source bereitgestellt werden, werden ständig angepasst und aktualisiert. Die folgenden Schritte können als Anhaltspunkte für den allgemeinen Prozess dienen, ein Objekt auf den 3D-Druck vorzubereiten und die G-Code-Datei zu erzeugen. Gehen Sie davon aus, dass es immer wieder Änderungen an der Benutzeroberfläche und an den Optionen geben wird, und dass das Programm seine »intelligenten« Entscheidungen ändert, wie es die besten Einstellungen für Objekte festlegt.

Gehen Sie für die Verarbeitung Ihres gültigen Modells wie folgt vor:

### 1. Laden Sie das zu druckende Modell in Slic3r.

Wenn Sie ein gültiges Modell besitzen, das ordnungsgemäß ausgerichtet und skaliert wurde, laden Sie es in Slic3r, indem Sie die Datei in das PLATER-Fenster ziehen, in dem die Umrisse Ihres Modells von oben gezeigt werden. Sie können gegebenenfalls mehrere Objekte auf die virtuelle Druckplatte laden und verschieben (siehe Abbildung 15.12).

### 2. Wählen Sie geeignete Druckeinstellungen für Ihr Modell aus.

Auf der Registerkarte PRINT SETTINGS (Druckeinstellungen) (siehe Abbildung 15.13) finden Sie Optionen, mit denen Sie Slic3r mitteilen, wie das Modell gedruckt werden soll, und mit welcher Geschwindigkeit und Qualität:

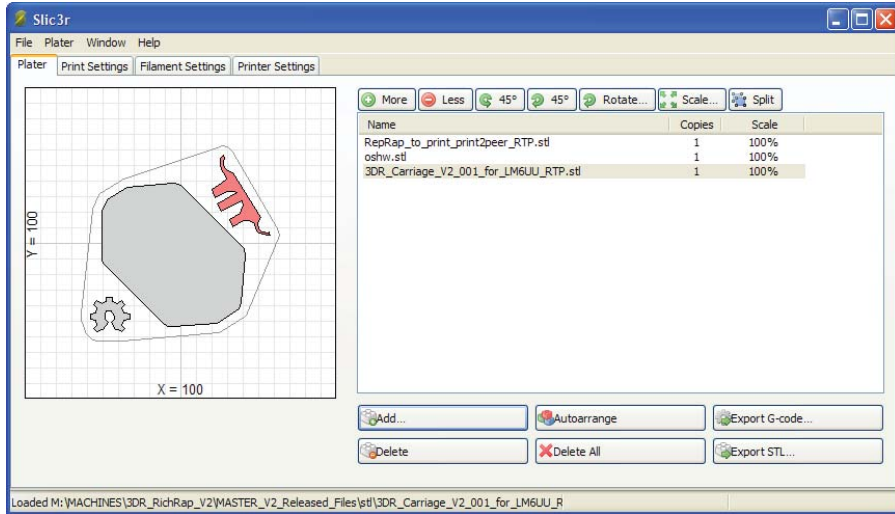


Abbildung 15.12: Das Plater-Fenster ist eine virtuelle Druckplatte, auf der Sie Ihre 3D-Objekte vor der Verarbeitung ablegen können.

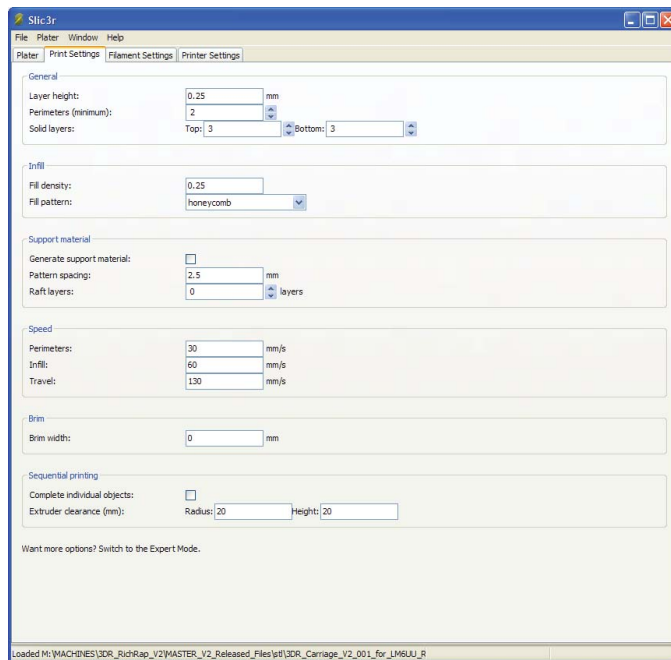


Abbildung 15.13: Auf der Registerkarte Print Settings (Druckeinstellungen) in Slic3r geben Sie an, wie stabil Ihr Teil gedruckt werden soll, und mit welcher Geschwindigkeit.

- ✓ **Layer Height** (Schichthöhe): Bestimmt, wie fein Ihr Modell vertikal geschichtet wird. Je feiner die Schichten sind, desto besser sieht Ihr fertiger Druck aus, aber desto länger dauert er auch. Eine typische Schichthöhe beträgt 0,25 mm für eine Düse mit 0,4 oder 0,5 mm Durchmesser.
- ✓ **Perimeters (minimum)** (Umfang (Minimum)): Gibt an, wie oft der Extruder den äußeren Umriss einer Schicht zeichnet, bevor er die Füllung vornimmt. Normalerweise verwenden Sie mindestens zwei Umfänge, um ein solides, gut aussehendes Objekt zu erstellen.
- ✓ **Solid Layers (Top and Bottom)** (Feste Schichten (oben und unten)): Diese Einstellungen bewirken, dass die Ober- und Unterseite eines Objekts stabil sind. Für die meisten Modelle sollten Sie mit drei oberen und drei unteren Schichten beginnen.



Wenn Sie 0 obere Schichten und keine Ausfüllung auswählen, wird Ihr Modell als Außenmantel mit der gewählten Anzahl an Umfängen gedruckt. Diese Einstellung ist optimal für den Druck von Töpfen, Vasen oder anderen Hohlkörpern. Wir werden später in diesem Kapitel noch auf andere Druckoptionen für Töpfe eingehen.

- ✓ **Fill Density** (Füllichte): Wird in Prozent angegeben. Eine Einstellung von 0,25 bewirkt eine Füllichte von 25 % Kunststoff für ein Objekt. Ein Wert von 0,3 (30 %) ist eine sinnvolle Einstellung für die meisten funktionalen Teile.



Die Objekte, die Sie drucken, brauchen so gut wie nie eine Füllung von 100 %. Sie sollten nicht zu viel Kunststoff für nur eine leichte Verbesserung der Stärke verschwenden. Es ist ganz normal, dass Demo-Modelle mit weniger als 15 % Füllung gedruckt werden. Funktionale Teile, wie beispielsweise für den Bau eines 3D-Druckers, benötigen normalerweise eine Füllung von 25 bis 50 %.

- ✓ **Fill Pattern** (Füllmuster): Bietet eine Auswahl, wie ein Objekt im Inneren gefüllt wird. Die häufigsten Füllmuster sind geradlinig und wabenartig. Für runde Teile oder für Vasen, Töpfe und so weiter wird auch ein konzentrisches Füllmuster verwendet. Für mechanische Teile stellen Waben die höchste Stabilität dar, aber der Druck ist etwas langsamer als bei einer geradlinigen Füllung.
- ✓ **Generate Support Materials** (Stützmaterial anlegen): Sie können festlegen, dass automatisch Stützmaterial angelegt wird, wenn Ihr Objekt deutliche Überhänge aufweist. Die Raft-Option wird nicht häufig verwendet. Sie baut ein Kunststofffundament auf der Druckplattform auf, bevor das Objekt ausgedruckt wird. Damit vermeidet man für manche Materialien ein Verziehen, und unebene Druckplattformen können ausgeglichen werden, aber das Fundament muss vom eigentlichen Druck wieder entfernt werden und es wird mehr Material benötigt (das dann entsorgt werden muss).
- ✓ **Speed** (Geschwindigkeit) für Umfänge, Füllung und Wege: Die Einstellungen für die Geschwindigkeit legen fest, wie schnell die Maschine das Objekt baut. Die maximale



Geschwindigkeit und die Beschleunigung werden durch die Firmware Ihrer Elektronik begrenzt. Experimentieren Sie ein wenig mit dieser Einstellung, aber fangen Sie langsam an, um ein Gefühl dafür zu entwickeln, wie schnell Sie mit Ihrem RepRap-Drucker arbeiten können, und welche Probleme entstehen, wenn Sie schneller oder langsamer drucken. Die meisten modernen RepRap-Drucker können mit 50 mm/s für die Umfänge und 70 mm/s für die Füllung oder schneller arbeiten. Die Weggeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit, mit der Ihre Maschine zwischen den Materialextrusionen die Position wechselt. Sie wollen natürlich, dass sich der Druckkopf so schnell wie möglich an eine neue Position bewegt, nachdem er eine Schicht erstellt hat, und bevor er eine neue beginnt. Ziel ist, die Druckzeit so gering wie möglich zu halten und die allgemeine Qualität zu verbessern.

Es gibt eine Obergrenze, wie schnell Sie mit den Motoren und den mechanischen Teilen Ihres 3D-Druckers arbeiten können. Beginnen Sie mit 150 mm/s und steigern Sie diesen Wert in kleinen Schritten. Hohe Weggeschwindigkeiten für einen RepRap mit Extruder am beweglichen Wagen liegen bei ca. 280 mm/s. Ein leichter Bowden-Extruder auf einem Delta-Drucker kann bis zu 400 mm/s erreichen, was wirklich schnell ist, aber noch vor ein paar Jahren waren die 3D-Drucker für den Hausgebrauch um den Faktor 10 langsamer.

- ✓ **Brim Width** (Randbreite): Diese Einstellung beschreiben wir am Ende des Kapitels.
- ✓ **Sequential Printing** (Sequentielles Drucken): Aktivieren Sie diese Einstellung, wenn Sie jedes Objekt einzeln auf Ihrer Druckplatte drucken wollen. Normalerweise wird eine ganze Platte mit Teilen Schicht für Schicht gedruckt. Das ist die schnellste Vorgehensweise. Wenn Sie die ganze Platte auf einmal drucken, bedeutet das natürlich auch, dass, wenn ein Fehler beim Ausdruck auftritt oder wenn eines der Objekte sich löst, der gesamte Druck ruiniert ist. Beim sequentiellen Druck drucken Sie jeweils nur ein Teil, womit Fehler begrenzt werden, was aber auch sehr viel länger dauert. Und weil Ihr Extruder in der Lage sein muss, um ein bereits gedrucktes Objekt herum zu drucken, müssen Sie den Mindestabstand für Ihr Hot-End angeben, sodass es nicht in ein bereits fertiges Teil rauscht. Diese Einstellung begrenzt auch, wie viele Teile Sie auf der Druckplattform platzieren können.

### **3. Wählen Sie das Druckmaterial und die Temperatur aus.**

Geben Sie auf der Registerkarte FILAMENT SETTINGS (Fadeneinstellungen) den Durchmesser Ihres Fadens und die Temperatur für die Extrusion an, basierend auf dem verwendeten Material (siehe Abbildung 15.14). Sie können Slic3r anweisen, ein Heizbett zu berücksichtigen, falls Sie ein solches installiert haben. Überprüfen Sie, ob Sie den Durchmesser Ihres Fadens korrekt gemessen haben. Beachten Sie, dass Sie beim Druck mit PLA die Extrudertemperatur auf ca. 200 Grad Celsius setzen sollten, und die Temperatur für das Heizbett auf 60 Grad. Hier haben Sie außerdem die Möglichkeit, die Temperaturen für die erste Schicht leicht zu erhöhen. Das ist praktisch, wenn der Kunststoff nicht gut an der Druckplatte haftet. Wählen Sie diese Temperatur aber nicht zu hoch, weil auch eine zu hohe Temperatur verhindert, dass das Material haftet.

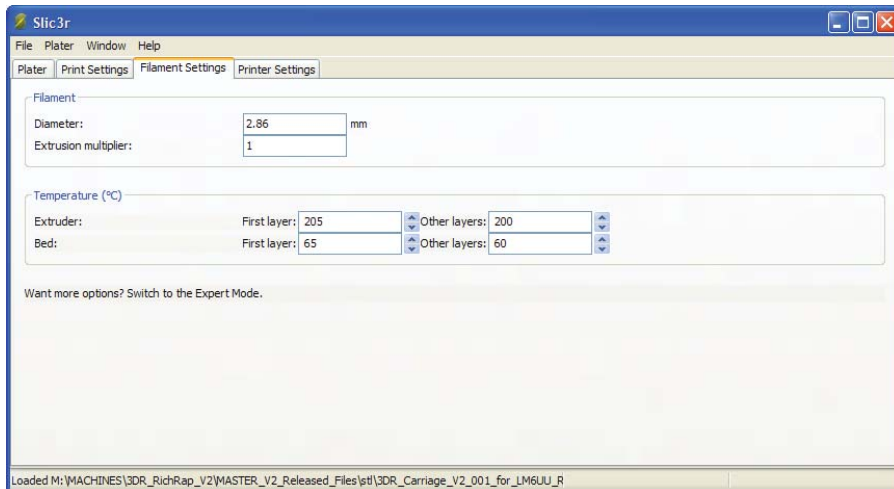


Abbildung 15.14: Auf der Registerkarte Filament Settings (Fadeneinstellungen) können Sie Slic3r mitteilen, welches Material Sie verwenden und wie heiß es gemacht werden soll.

#### 4. Stellen Sie die Größe Ihres 3D-Druckers und den Firmware-Typ ein.

Klicken Sie auf die Registerkarte PRINTER SETTINGS (Druckereinstellungen) (siehe Abbildung 15.15). Hier sehen Sie den Wert, der die mechanische Größe Ihres 3D-Druckers angibt, die Sie bei der ersten Ausführung des Startup-Assistenten angegeben haben. Sorgen Sie dafür, dass die Größe des Druckbetts und der Druckmittelpunkt Ihrer Maschine entsprechen. Die anderen Optionen auf dieser Registerkarte sind unter anderem:

- ✓ **Z Offset:** Diese Einstellung ist praktisch, wenn Sie mehrere Extruder einsetzen, die unterschiedlich lange Hot-Ends haben können, oder wenn die Düse zu weit von Ihrem Druckbett entfernt ist oder diesem zu nahe kommt. Geben Sie hier einen positiven Wert ein, um das Hot-End weiter von der Druckplatte zu entfernen, bevor der Druck beginnt. Abhängig davon, wie Ihr 3D-Drucker konfiguriert ist, kann hier möglicherweise keine negative Zahl eingegeben werden, um das Hot-End vor dem Drucken weiter abzusenken. Wenn dies der Fall ist, können Sie das Hot-End in der Regel mechanisch einstellen. Wir werden später noch genauer darauf eingehen, wenn wir den Drucker einrichten und kalibrieren.
- ✓ **G-Code Flavor (G-Code-Variante):** Gibt den Typ der Open Source-RepRap-Firmware an, den Sie in Ihrer Elektronik verwenden. Erkundigen Sie sich bei Ihrem Anbieter, ob Ihr 3D-Drucker ein RepRap ist. Die hier verfügbare Option ist normalerweise REPRAP (MARLIN/SPRINTER/REPETIER).
- ✓ **Nozzle Diameter (Düsendurchmesser):** Überprüfen Sie, ob der richtige Düsendurchmesser angegeben ist.

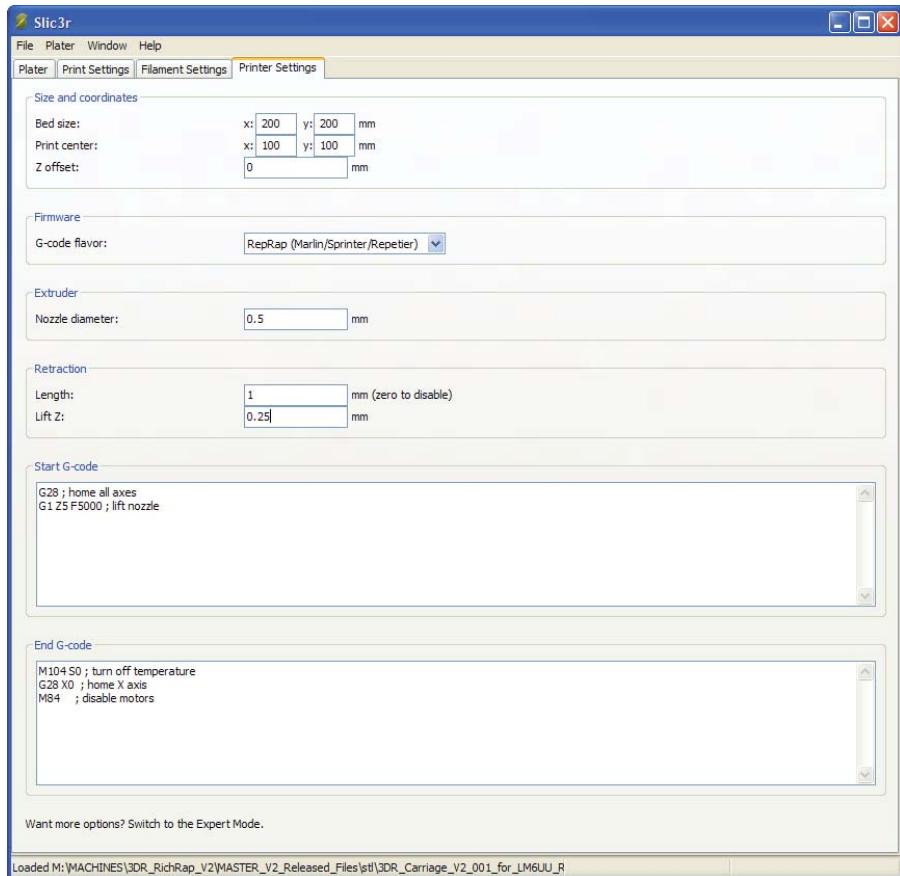


Abbildung 15.15: Auf der Registerkarte *Printer Settings* (Druckereinstellungen) geben Sie die Abmessungen Ihres RepRap-3D-Druckers ein sowie den Typ der in Ihrer Elektronik verwendeten Firmware.

- ✓ **Retraction – Length** (Rückzug – Länge): Das Rückzugselement ist ein sehr wichtiger Teil der Extruderbewegung. Diese Rückzugslänge ist eine Bewegung, um den geschmolzenen Faden in das Hot-End zurückzuziehen, nachdem ein Abschnitt gedruckt wurde. Dies passiert normalerweise, bevor sich das Hot-End an eine neue Position auf der Druckplatte bewegt, wo ein weiterer Abschnitt Material ausgegeben wird. Sie brauchen nur einen Rückzug anzugeben. Die Firmware weiß, wie weit der Faden um diesen Abstand wieder vorgeschoben werden muss, wenn das Hot-End die nächste Druckposition erreicht hat, bevor die Extrusion beginnt. Wir verwenden diese Einstellung, um Blasen und Streifen für den geschmolzenen Kunststoff zu vermeiden, der unseren Ausdruck verdirbt. Ohne aktivierten Rückzug von mindestens 0,5 mm erhalten Sie wahrscheinlich sehr hässlich gedruckte Objekte.



Jeder Extruder wird unterschiedlich eingerichtet. Probieren Sie ein bisschen herum, um den optimalen Rückzug für Ihren Extruder zu finden. Beachten Sie, dass diese Zahl abhängig vom verwendeten Material angepasst werden muss. Bei einem Extruder mit Zahnrad oder einem direkt angetriebenen Extruder beginnen Sie normalerweise mit einem Rückzug von 0,5 mm und können davon ausgehen, dass ca. 1,5 mm erforderlich sind, um Streifen und Blasen zu vermeiden. Setzen Sie den Wert für den Rückzug nicht zu hoch an, weil Sie damit verursachen könnten, dass Luft in die Düse gesaugt wird, was zu vielen anderen Problemen führt. Ein Bowden-Drucker benötigt einen sehr viel längeren Rückzug aufgrund der Federwirkung auf den Faden, der in die PTFE-Röhre gedrückt wird. Anhaltswerte reichen von 1,5 mm bis 5 mm Rückzug.

- ✓ **Retraction – Lift Z** (Rückzug – Anheben Z): Diese Einstellung gestattet, den Extruder unmittelbar nach dem Rückzug ein wenig über dem gedruckten Objekt anzuheben, unmittelbar bevor sich die Maschine weiterbewegt. Damit erhält der schnell bewegte Druckkopf einen etwas größeren Abstand, wenn er sich über eine Druckschicht an die neue Druckposition bewegt. Auch hier müssen Sie nur eine positive Zahl eingeben, in der Regel eine zusätzliche Schichthöhe (die Sie auf der Registerkarte PRINT SETTINGS (Druckereinstellung) beispielsweise mit 0,25 mm festgelegt haben könnten). Wie beim Rückzug des Extruders weiß die Firmware auch hier, dass sie sich um denselben Betrag wieder nach unten bewegen muss, wenn die Bewegung abgeschlossen ist, und bevor die nächste Extrusion beginnt. Diese Einstellung kann praktisch sein, wenn Ihre Objekte beim Drucken vom Druckbett gestoßen werden (oder wenn die Schichten aus der korrekten Ausrichtung kippen), weil die Motoren an die Ecken oder an bereits ausgedruckte Komponenten des Objekts stoßen.



Wenn Lift Z nicht verhindern kann, dass Objekte von der Druckplatte gestoßen werden oder dass bereits gedruckte Schichten verschoben werden, kann es daran liegen, dass sich die Maschine zu schnell bewegt. Versuchen Sie, die Bewegung auf der Registerkarte PRINT SETTINGS zu verlangsamen. Wird das Problem damit nicht gelöst, gibt der Extruder wahrscheinlich zu viel Kunststoff aus, der sich beim Drucken am Hot-End fängt. Weitere Informationen darüber, wie Sie eine ordnungsgemäße Kalibrierung durchführen, finden Sie später in diesem Kapitel.

- ✓ **Start and End G-Code** (G-Code für den Start und das Ende): Diese Befehle starten und beenden einen Druck. Dieser G-Code wird der Ausgabe jedes einzelnen gedruckten Teils hinzugefügt und kann der Firmware mitteilen, wie es den spezifischen RepRap-3D-Drucker am besten auf den Druck dafür vorbereitet und wie er am besten abgeschaltet wird.

Der standardmäßige Start-G-Code in Slic3r weist Ihren Drucker an, an die Home-Position zu gehen und die Düse leicht anzuheben. Ihr Druck beginnt, nachdem der Extruderkopf und das Heizbett die auf der Registerkarte FILAMENT SETTINGS von Slic3r angegebene Temperatur erreicht haben. Der Ende-G-Code schaltet den Extruder und die

Heizer für das Druckbett ab und fährt den Drucker an seine Home-Position, allerdings nur die X-Achse, weil Sie nicht wollen, dass der Wagen in das ausgedruckte Objekt fährt. Anschließend werden die Schrittmotoren deaktiviert, sodass die Maschine noch läuft, aber nicht mehr in Betrieb ist.



Möglicherweise wollen Sie noch weitere benutzerdefinierte G-Code-Befehle verwenden. Beispielsweise haben viele RepRap-Elektroniksysteme einen Lautsprecher auf der Karte, der Töne und Signale ausgeben kann. Sie können ihn steuern, indem Sie (im Start-G-Code) drei kurze Töne für den Beginn eines Drucks spezifizieren. Für das Ende des Drucks könnten Sie im Ende-G-Code einen langen und lauten Ton ausgeben, um das Ende des Drucks zu signalisieren. Außerdem können noch viele weitere Operationen über den G-Code gesteuert werden, wie beispielsweise das Einschalten von Lüftern nach dem Druck, um das gedruckte Objekt und die Druckplatte abzukühlen. Eine weitere Option im Expertenmodus von Slic3r löst eine Digitalkamera aus, die nach jeder Druckschicht eine Aufnahme macht, aus dem Sie später einen Zeitrafferfilm anfertigen können, der zeigt, wie Ihr Objekt während des Drucks wächst.

### 5. Klicken Sie auf der Registerkarte PLATER auf die Schaltfläche EXPORT G-CODE.

Abhängig von der Komplexität der zu druckenden Objekte, der Leistung Ihres Computers und der ausgewählten Schichtstärke kann der Export des G-Codes ein paar Sekunden, mehrere Minuten oder (in Extremfällen) Stunden dauern. Seien Sie geduldig.

Nachdem Sie alle Einstellungen vorgenommen haben und keine Warnungen ausgegeben wurden, sollte Ihr G-Code für Ihren Drucker fertig sein. Bevor Sie jedoch drucken, müssen Sie Ihren 3D-Drucker kalibrieren. Damit beschäftigen wir uns als Nächstes, beginnend mit dem unheimlich wichtigen Firmware-Setup.

## Den 3D-Drucker kalibrieren

Nachdem wir unsere Firmware eingerichtet und die mechanische Bewegung des RepRap-Druckers größtenteils kalibriert ist, umfasst die abschließende Vorbereitung auf den 3D-Druck die folgenden Verfahren:

- ✓ Abschließende Kalibrierung des Extruders und des Hot-Ends
- ✓ Eingabe dieser Daten in die Firmware
- ✓ Erneutes Kompilieren und Herunterladen der Firmware



Widerstehen Sie der Versuchung, diesen nächsten Abschnitt zu überspringen. Eine ordnungsgemäße Kalibrierung des Extruders und des Hot-Ends kann den Unterschied zwischen einem schrecklichen Druckbild und einem erstaunlich guten 3D-Druck ausmachen.

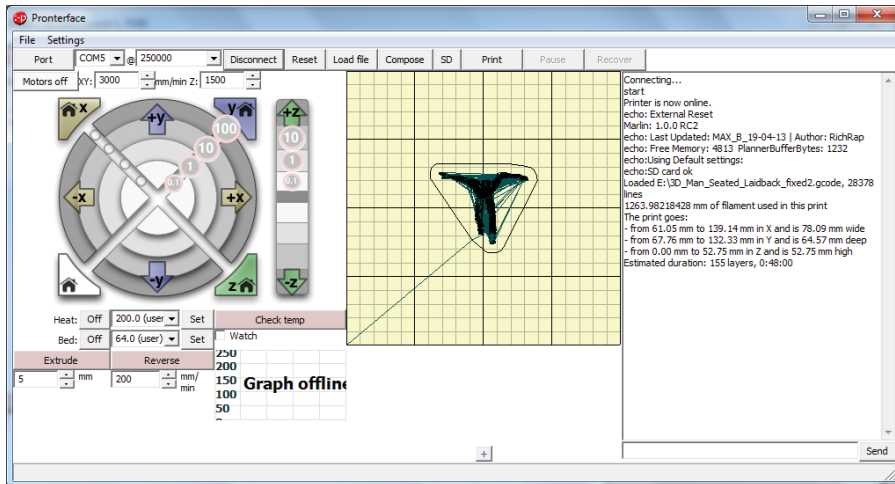


Abbildung 15.16: Pronterface, ausgeführt für unseren RepRap-Drucker, mit druckbereit geladenem G-Code

Für den nächsten Abschnitt führen wir Pronterface aus. Es gibt noch zahlreiche andere Host-Programme. Wir haben uns dafür entschieden, weil es so einfach in der Bedienung ist (siehe Abbildung 15.16). Pronterface wurde von Kliment Yanev als Open Source-Steuerschnittstelle für RepRap-3D-Drucker entwickelt und programmiert. Sie erhalten das vollständige Paket auf GitHub:

<https://github.com/kliment/Printrun>

Sie laden das Paket von GitHub herunter, indem Sie auf die Schaltfläche DOWNLOAD ZIP rechts auf der GitHub-Seite klicken.

Anders als 2D-Drucker, die in allen Anwendungen einfach als »Drucker« angezeigt werden, benötigen die meisten 3D-Drucker ein Host-Programm, um die spezifische G-Code-Datei aufzubereiten, zu steuern und zu senden. Wir können also nicht einfach die Maschine einschalten und auf DRUCKEN klicken. Hier sind die Schritte beschrieben, wie Sie in Pronterface vorgehen:

1. **Schalten Sie den 3D-Drucker ein und schließen Sie ihn an den USB-Port an.**
2. **Wählen Sie den Kommunikationsanschluss aus der Liste aus.**
3. **Prüfen Sie, ob Sie die richtige Geschwindigkeit ausgewählt haben.**

Für die Marlin-Firmware beträgt diese Geschwindigkeit normalerweise 250.000.

4. **Klicken Sie auf VERBINDEN.**

Wenn der Kommunikationsanschluss und die Geschwindigkeit festgelegt wurden, erhalten Sie auf der rechten Seite im Fenster die Meldung, dass Sie angemeldet sind. Daran erkennen Sie, dass Sie die Kontrolle über den Drucker haben und er Befehle entgegennimmt.



## Nivellierung der Druckplatte

Als Erstes müssen Sie einstellen, dass die Düse Ihres Hot-Ends ausreichend weit von der Druckoberfläche entfernt ist und dass Ihre Druckfläche gerade und eben ist.

Das allgemeine Verfahren ist in vielen RepRap-Ressourcen beschrieben und unterscheidet sich zwischen den verschiedenen 3D-Druckern. Normalerweise müssen Sie drei oder vier bestimmte Punkte Ihres Druckbetts anheben oder absenken, das normalerweise aus PCB-Material besteht und mit Federschrauben befestigt ist oder gehalten wird, die dem Anwender gestatten, das Druckbett zu nivellieren.

Bevor Sie anfangen, das Druckbett zu nivellieren, überprüfen Sie, ob die anderen wichtigen Baugruppen Ihres 3D-Druckers eben sind und an allen Seiten dieselben Abstände haben, wie beispielsweise der bewegliche X-Wagen und die vertikale Z-Bewegung.

Der Hauptsensor für die korrekte Positionierung des Hot-Ends weg vom Druckbett ist der *Z-Achsen-Endanschlag*. Dabei handelt es sich in der Regel um einen mechanischen Schalter, der nach oben oder unten geschaltet werden kann, oder um einen Magnetsensor, der auf eine bestimmte Distanz eingestellt werden kann, indem ein kleiner Drehknopf gedreht wird, ein sogenanntes *Potentiometer*. Häufig zeigt eine kleine LED an, dass die Endanschlagposition erreicht ist. Wenn Ihre Achse nicht anhält, oder wenn die LED nicht leuchtet, wenn die Achse an die Home-Position gefahren wird, haben Sie vielleicht in Ihrer Firmware eine falsche Richtung angegeben (siehe Kapitel 13). In diesem Fall ändern Sie die Einstellung `X_ENDSTOP_INVERTING = true` in Ihrer `configuration.h` der Marlin-Firmware auf `false`.



Wenn Sie ein Heizbett verwenden, schalten Sie es ein und lassen Sie es mehrere Minuten lang bei voller Temperatur laufen (sodass sich alles ausdehnen kann, so wie es auch beim Drucken der Fall ist), bevor Sie den mechanischen Abstand der Hot-End-Düse zum Heizbett einstellen.

Überprüfen Sie die Funktion der Endanschlagschalter, indem Sie die einzelnen Achsen nacheinander in Home-Position fahren (Abbildung 15.17 zeigt die Steuerelemente in Pronterface). Anschließend legen Sie den Z-Achsen-Abstand so fest, dass die Hot-End-Düse ausreichend weit vom Druckbett entfernt ist. Dazu bewegen Sie am besten den Druckkopf in die Mitte des Druckbetts. Bei einem standardmäßigen RepRap legen Sie diesen Abstand fest, indem Sie X um 100 mm und Y um 100 mm bewegen.

Welchen Abstand Sie einstellen sollten, ist von der Düsengröße abhängig, und davon, wie gut Sie die Druckbettoberfläche nivellieren konnten. Auch aus diesem Grund ist eine Glasscheibe (die in der Regel relativ flach ist) eine gute Druckoberfläche. Sie müssen ein Blatt Papier unter die Düse schieben können, wenn sie sich an der Z-Home-Position befindet. Überprüfen Sie, ob dieser Spalt an allen vier Ecken und in der Mitte gleich ist. Heben und senken Sie die Düse mithilfe der Schaltflächen für die Z-Bewegung in Pronterface. Anschließend können Sie die Position Ihres Z-Endanschlags auf der Z-Achse so verschieben, dass er in der richtigen Distanz vom Druckbett aktiviert wird (verwenden Sie Papier als Abstandshalter). Wenn Sie die Z-Achse mithilfe der Schaltfläche Z HOME in Pronterface an die Home-Position

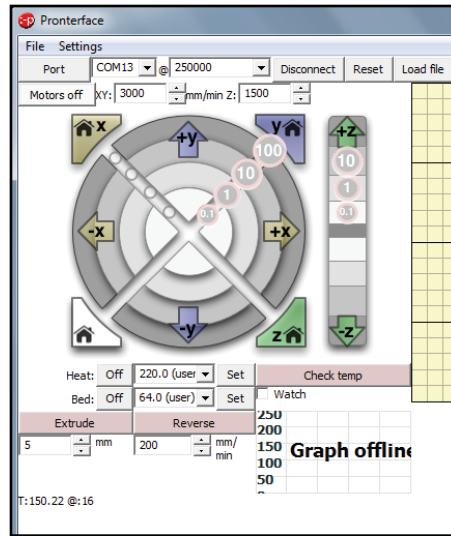


Abbildung 15.17: Mit den Steuerelementen von Pronterface können Sie den Druckkopf für die Nivellierung des Druckbetts positionieren und die richtige Distanz der Hot-End-Düse und die Vorheizung vor dem Drucken festlegen.

fahren (siehe Abbildung 15.17), sollte die Düse angehoben und dann abgesenkt werden, bis der Z-Endanschlag ausgelöst wird. Wenn der Abstand dann immer noch nicht korrekt ist, verschieben Sie den Z-Anschlag leicht und klicken erneut auf die Schaltfläche HOME.

## Einstellung der Hot-End-Temperaturregelung

Im nächsten Schritt kalibrieren Sie die Temperaturregelung für Ihr spezifisches Hot-End. Dazu geben Sie den Befehl `m303` unten rechts auf dem Pronterface-Bildschirm ein und klicken dann auf SEND (Senden) (siehe Abbildung 15.18). Dieser Befehl veranlasst den Drucker, mehrere Heiz- und Kühlzyklen zu durchlaufen. Nach diesen Zyklen gibt er die Einstellungen aus, die Sie in die Firmware für `DEFAULT_Kp`, `DEFAULT_Ki` und `DEFAULT_Kd` in `configuration.h` eingeben müssen (wie in Kapitel 13 beschrieben).

Schreiben Sie sich die für `Kp`, `Ki` und `Kd` angezeigten Werte auf. Geben Sie sie nach dem letzten Schritt der Kalibrierung in die Firmware ein.

## Kalibrierung der Extruderdistanz

Bevor Sie den letzten Wert berechnen können, müssen Sie dafür sorgen, dass die richtige Menge Kunststoff für eine festgelegte Extruderdistanz ausgegeben wird. Sie führen eine einfache Test-Extrusion aus, messen die Ergebnisse und berechnen die Änderung. Das ist nicht schwer. Wir zeigen es Ihnen schrittweise.

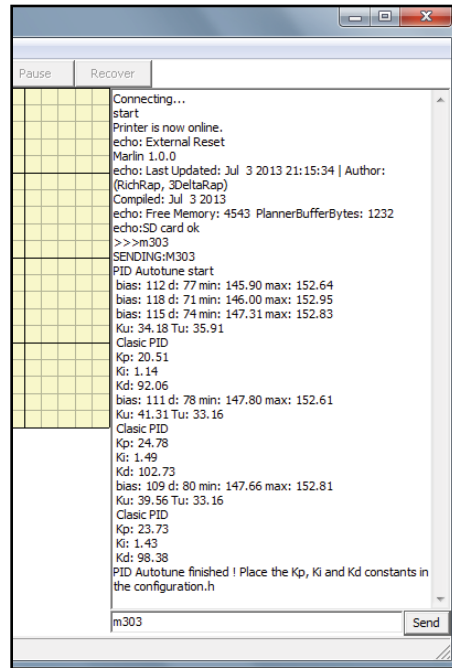


Abbildung 15.18: Der G-Code-Befehl m303 führt eine Routine aus, die die ideale Einstellung für den Regelkreis für Ihre Firmware berechnet.



Diese Extruderkalibrierung ist wirklich wichtig. Sie sorgt dafür, dass die Firmware genau weiß, wieviel Material ausgegeben wird, und dass Slic3r präzise Berechnungen für Ihre Maschine durchführen kann, um den G-Code für den Ausdruck von Objekten zu erzeugen.

Weitere Informationen über wichtige Firmware-Einstellungen finden Sie in Kapitel 13. Achten Sie vor allem auf den vierten Wert in der Liste `DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT`. Er gibt an, wie viele Schritte der Extrudermotor ausführt, um 1 mm Faden in das Hot-End zu transportieren.

Sie können extrudieren und Extruder zurückziehen, aber nur wenn er auf Temperatur ist. Diese manuelle Kontrolle ist entscheidend für das Laden und Entfernen des Fadens und für die Reinigung der Düse. In Pronterface können Sie den Extruder anweisen, Material auszugeben oder den Schrittmotor auf eine festgelegte Distanz umgekehrt zu betreiben (angegeben in Millimetern, wie in Abbildung 15.19 links unten gezeigt).

Die Kalibrierung Ihres Extruders sorgt dafür, dass sich die Extruderachse um eine bestimmte Anzahl an Schritten pro Einheit (eine Einheit ist 1 mm) bewegt und genau um die Distanz, wie in Pronterface festgelegt. Wenn der von Slic3r erzeugte G-Code eine Extrusion von 2 mm anweist, können Sie also davon ausgehen, dass die richtige Menge Material ausgegeben wird. Berechnen Sie den richtigen Wert unter Verwendung der folgenden Schritte:

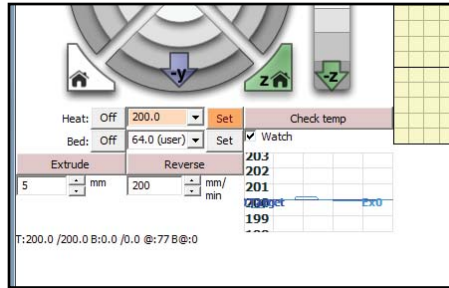


Abbildung 15.19: Steuerung des Extruders in Pronterface

1. Heizen Sie Ihren Extruder auf die Temperatur für das verwendete Material auf (200 °C für PLA und 240 °C für ABS).

Für diese Kalibrierung brauchen Sie Ihr Heizbett nicht aufzuheizen.

2. Wenn das Hot-End auf Temperatur ist, setzen Sie den Faden ein.

Durch Drücken und Anklicken der EXTRUDER-Schaltfläche in Pronterface sollte der Faden um etwa 5 mm pro Durchgang gefördert, erfasst und in Ihren Extruder eingeführt werden.

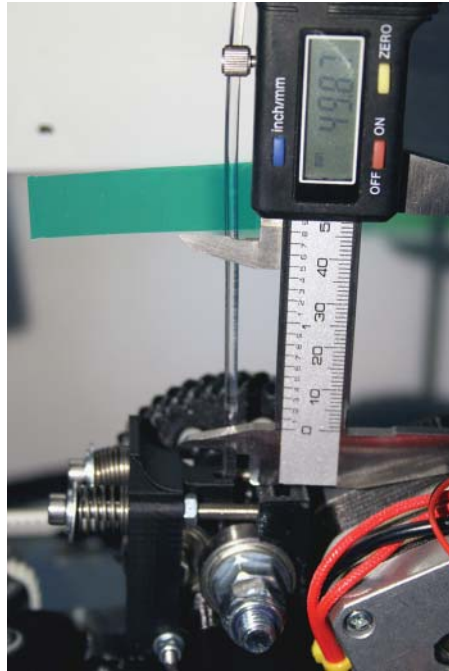


Wenn Sie jetzt feststellen, dass der Extruder stockt oder sich dreht und versucht, sehr viel mehr als 5 mm auszugeben, verringern Sie einfach den Wert in der Firmware, sodass Sie eine präzisere Kalibrierung durchführen können.

Abhängig vom Typ des Extruders, dem Typ des Antriebs, der dafür ausgewählten Elektronik und der Einstellung des Microstep-Werts sollte der Wert für die Schritte pro Einheit irgendwo zwischen 50 und 1100 liegen. Wenn Sie Motoren mit 200 Schritten pro Umdrehung verwenden, mit 16x Microstepping, würde eine Umdrehung 3200 Schritte bedeuten. Eine volle Drehung fördert normalerweise sehr viel Faden in Ihren Extruder, wenn Sie also keine anderen Hinweise zu Ihrem Extruder haben, versuchen Sie es zunächst mit einem Wert von ca. 200.

3. Kennzeichnen Sie den Faden: Kleben Sie einen Streifen Klebeband in einem Abstand von ca. 50 mm auf den eingehenden Faden, gemessen von der Eintrittsöffnung für den Faden am Extruder.
4. Messen Sie die genaue Distanz zwischen der Kennzeichnung und dem Extruderrumpf vor und nach der Ausgabe von 20 mm Faden. Schreiben Sie sich diese Zahl auf.

Der Abstand zwischen der Kennzeichnung und dem Extruderrumpf könnte zum Beispiel 48 mm betragen. Am besten messen Sie mit einem digitalen Mikrometer, einem sehr praktischen Werkzeug für den 3D-Druck (siehe Abbildung 15.20). Sie können erstens damit prüfen, ob Ihre gedruckten Teile so angefertigt wurden, wie geplant, und zweitens den Fadendurchmesser verschiedener Spulen für die Einstellungen in Slic3r messen.



*Abbildung 15.20: Mit einem digitalen Mikrometer können Sie die Distanz messen, den der eingeführte Faden tatsächlich zurückgelegt hat, wenn 20 mm ausgegeben wurden.*

- 5. Geben Sie 20 mm Kunststoffaden in Schritten von 5 mm aus, mit einer Verzögerung von wenigen Sekunden zwischen den Schritten.**



Diese Verzögerung soll dafür sorgen, dass Sie das Material nicht zu schnell ausgeben. Damit wird das Risiko reduziert, dass der Motor springt.

Der Faden sollte in einer gleichmäßigen Bewegung in Ihr Hot-End gefördert und extrudiert werden.

- 6. Messen Sie die neue Distanz des Spalts zwischen der Kennzeichnung und dem Extruder, genau wie zuvor.**

Wenn Ihr Extruder optimal kalibriert wurde, wäre die neue verbleibende Distanz (in unserem Beispiel) 28 mm. Wir haben den Extruder in Pronterface um 20 mm bewegt. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass diese neue Spaltgröße größer oder kleiner als die 28 mm ist, die wir erzielen wollten. Angenommen, wir messen in unserem Beispiel jetzt 32 mm.

Das bedeutet, der Extruder hat den Faden nur um 16 mm transportiert, statt um 20 mm, wie wir angenommen haben.

### 7. Berechnen Sie den Wert für die Schritte pro Einheit.

Jetzt verwenden wir die bekannte Anzahl der Extruderschritte pro Einheit in unserer Firmware (die wir in Schritt 2 auf 200 gesetzt haben) und die extrudierte Distanz, in unserem Beispiel 20 mm, um die Anzahl der Motorschritte zu berechnen, die Ihre Firmware soeben durchgeführt hat.  $200 \times 20 = 4000$ . Das ist die Anzahl der Motorschritte, die Ihre Firmware für 20 mm Extruderbewegung ausgeführt hat. Wir haben jedoch nur 16 mm Bewegung erzielt, deshalb berechnen wir unseren Ist-Wert für die Schritte pro Einheit, indem wir diese 4000 durch 16 dividieren. Wir erhalten den Wert 250.

Dieselbe Berechnung kann durchgeführt werden, wenn festgestellt wird, dass der Wert höher als 20 war. Das Ergebnis ist dann niedriger als die 200 Schritte, von denen wir anfangs ausgegangen sind.

### 8. Geben Sie den neuen Wert für die Schritte pro Einheit in die Firmware ein.

Wenn wir die Änderung für die Schritte pro Einheit in unsere Firmware eintragen, nämlich von 200 auf 250, erhalten wir die geforderten 20 mm Bewegung, wenn wir diese Operation erneut ausführen.

Nach der Aktualisierung Ihrer Firmware mit diesen Änderungen können Sie Ihr erstes 3D-Objekt ausdrucken.



Überprüfen Sie unbedingt regelmäßig, ob Ihr 3D-Drucker noch ordnungsgemäß ausgerichtet ist, und ob sich Ihr Hot-End noch in einer geeigneten Entfernung von Ihrem Druckbett befindet, bevor Sie drucken. Glücklicherweise müssen Sie die Temperatur Ihres Hot-Ends und den Extruder nicht bei jedem Druckvorgang kalibrieren. Sie haben diese Werte in Ihre Firmware eingegeben. Sie müssen nicht ständig angepasst werden.

## 3D-gedruckte Objekte

Jetzt sind wir bereit für den ersten 3D-Druck. Dies ist ein aufregender Moment, aber versprechen Sie sich nicht zu viel von diesem ersten Objekt. Statt sofort mit einem sehr komplizierten Objekt anzufangen, versuchen Sie am besten, etwas Einfaches zu drucken, beispielsweise einen Würfel. Sie können beim Ausdruck von Würfeln alles Mögliche testen, beispielsweise Materialien und Einstellungen. Der Ausdruck dauert nicht lange und Sie erkennen, wie die verschiedenen Einstellungen das Aussehen eines Objekts verändert.

Sie können einen einfachen Würfel mit einer Kantenlänge von 20 mm (20 mm x 20 mm und 10 mm hoch) unter [www.thingiverse.com/download:17279](http://www.thingiverse.com/download:17279) herunterladen.



Für den Ausdruck gehen Sie einfach wie folgt vor:

- 1. Laden Sie Ihr Würfelobjekt in Slic3r. Wählen Sie eine Füllichte von 20 % und drei durchgängige Schichten an der Ober- und Unterseite aus.**
- 2. Exportieren Sie den G-Code und laden Sie ihn dann in Pronterface.**

Pronterface zeigt das geladene Objekt in der Mitte des virtuellen Druckbetts. Sie können das Objekt anklicken und die verschiedenen Schichten durchblättern. Oben sehen Sie die Basisschicht mit einem Ring gekennzeichnet. Dieser Ring ist nicht Teil des gedruckten Objekts. Slic3r fügt ihn dem ersten zu druckenden Teil hinzu, wofür der Kunststofffluss aus dem Extruder vorbereitet wird, bevor das Objekt gedruckt wird. Die mittleren Abschnitte zeigen die hexagonale Füllung und (zum Schluss) die durchgängigen oberen Flächen (siehe Abbildung 15.21). Jetzt können Sie Ihr erstes Objekt drucken.

- 3. Legen Sie die Temperaturen für das Druckbett und das Hot-End für das zu druckende Material fest und warten Sie, bis der Drucker Temperatur hat.**



Das ist immer sinnvoll. Wenn Sie es vergessen, erledigt der G-Code es für Sie.

- 4. Extrudieren Sie manuell ein bisschen Material.**

Damit überprüfen Sie, ob alles ordnungsgemäß funktioniert, und fahren die Druckerachse auf die Home-Position.

**Wenn Sie die Drucktemperatur erreicht haben, klicken Sie auf PRINT (Drucken).**

Nach einer kurzen Verzögerung, während der der G-Code die Temperaturen überprüft und stabilisiert, bewegt sich der Druckkopf in die Mitte und beginnt, Ihren Würfel auszudrucken, normalerweise mit einem breiteren Umriss, um den Kunststofffluss zu starten. Während der erste Rahmen extrudiert wird, überprüfen Sie, ob der Kunststoff haftet. Der Druckkopf darf nicht über die Oberfläche kratzen, und er soll sich nicht zu weit davon entfernt befinden.

Eine der kompliziertesten Einstellungen ist der richtige Abstand der Hot-End-Düse über dem Druckbett. Abbildung 15.22 zeigt ein Beispiel für eine gut haftende erste Schicht. Hier hat der Drucker zwei Umfänge fertiggestellt. Beachten Sie den kleinen Grat. Die Füllung sieht solide aus und hat ähnliche Gänge. Bei der ersten Schicht sollten Sie keine Lücken zwischen den einzelnen extrudierten Linien sehen.

Wenn Sie feststellen, dass der Kunststoff nicht gut haftet, beenden Sie den Druck und passen Sie Ihren Düsenkopf an, sodass er etwas näher am Druckbett ist. Wenn kein Material austritt und Sie sehen, dass der Fluss endet und wieder anfängt, oder wenn Sie feststellen, dass sehr viel Material herausgedrückt wird (wodurch sehr hohe Gänge entstehen) und die Düse durch den Kunststoff gezogen wird, ist der Extruder etwas zu nah am Druckbett. Bewegen Sie den Düsenkopf vom Druckbett weg.

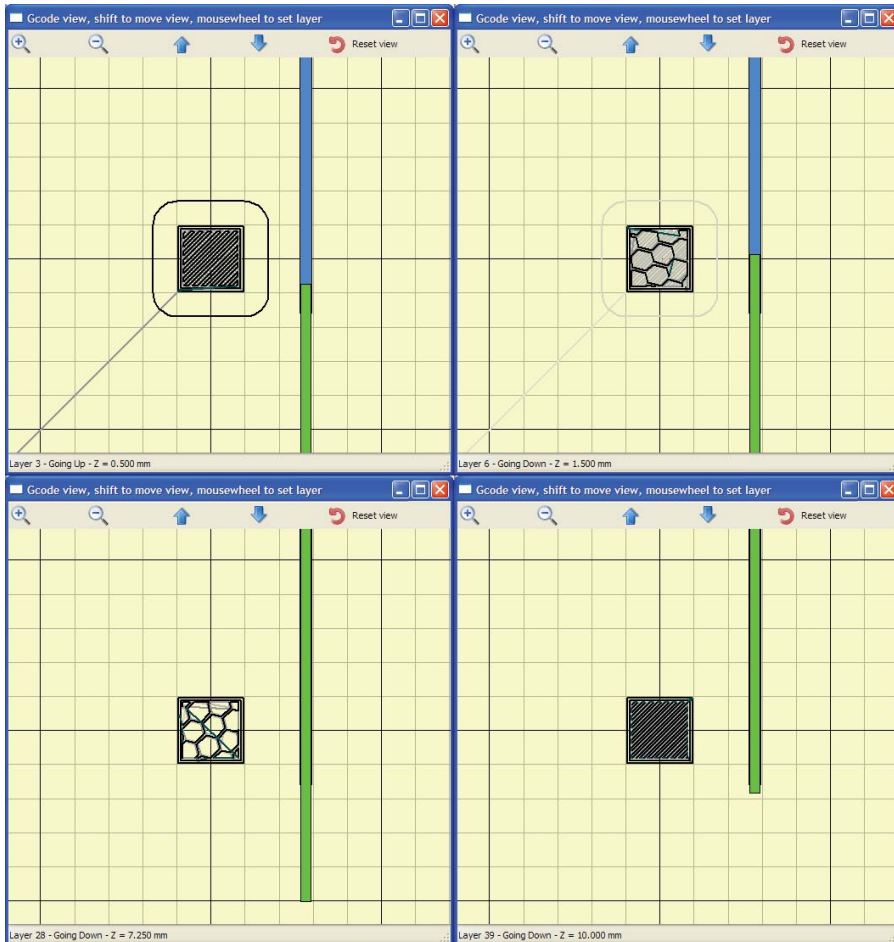
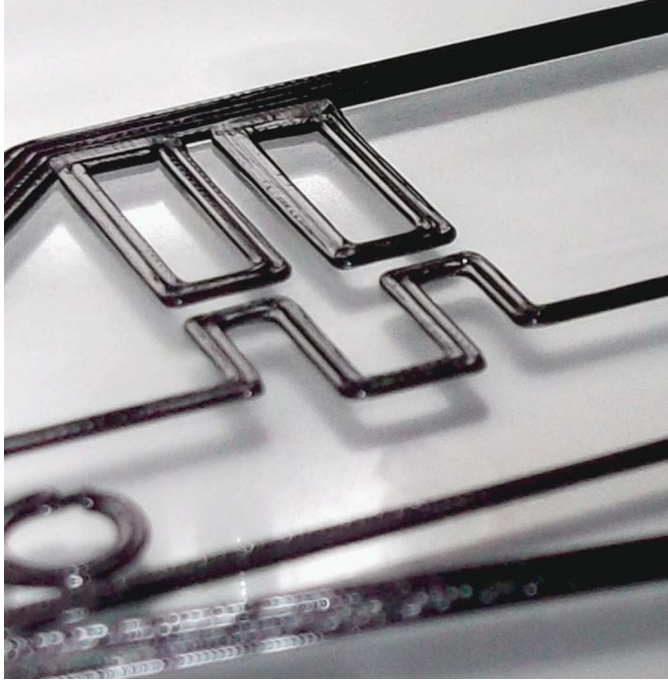


Abbildung 15.21: Pronterface zeigt Ihren Würfel in der Mitte des virtuellen Druckbetts.

**5. Wenn Ihr Würfel fertig ist, messen Sie überprüfen, ob seine Maße ausreichend nahe bei 20 mm und 10 mm liegen (siehe Abbildung 15.23).**

Wenn der Würfel wesentlich kleiner oder größer ausgedruckt wurde, also beispielsweise mit 40 mm, ist womöglich der Wert für `DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT` für die Z- und Y-Achsen falsch gewählt. Bestimmen Sie einen neuen Wert anhand der Berechnung, die wir für den Extruder durchgeführt haben. Damit dies sinnvoll ist, kennzeichnen Sie die Ausrichtung des Würfels beim Druck und merken sie sich:

- Die Distanz von der Vorderseite zur Rückseite des Würfels auf der Druckplatte ist das Y-Maß.
- Die Distanz von links nach rechts ist die X-Achse.



*Abbildung 15.22: Eine gut haftende erste Schicht*



Anfänger glauben häufig, die Z-Achse sei fehlerhaft eingestellt. Das liegt daran, dass viele RepRap-3D-Drucker für X und Y ähnliche Antriebe mit Riemen und Rollen verwenden. Aber andere Maschinen verwenden die verschiedensten Gewindestangen, Riemen oder Führungsschrauben für die Bewegung der Z-Achse.

## **6. Überprüfen Sie, ob Ihr Würfel korrekte 90°-Winkel besitzt.**

Liegen keine rechten Winkel vor, überprüfen Sie, ob Ihr X-Achsen-Wagen gerade an der beweglichen Y-Achse ausgerichtet ist.

Jetzt können Sie weitere Objekte ausdrucken und die Möglichkeiten Ihres 3D-Druckers erkunden. Es wird ein wenig dauern, bis Sie die verschiedenen Geschwindigkeiten, Temperaturen und Einstellungen für den Druck unterschiedlicher Objekte im Griff haben. Am besten, Sie probieren ganz viel aus. 3D-Drucker werden von vielen verschiedenen Faktoren auf unterschiedlichste Weise beeinflusst.

In den nächsten Abschnitten finden Sie ein paar Tricks und Tipps sowie Slic3r-Einstellungen für einige gebräuchliche 3D-Modell-Ausdrucke.

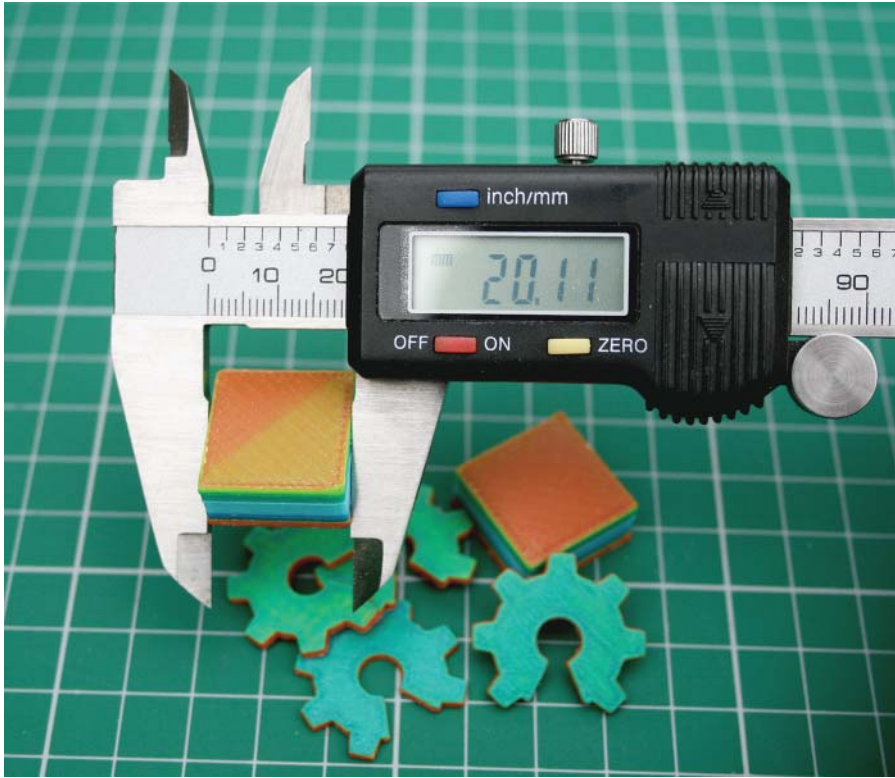


Abbildung 15.23: Überprüfen Sie, ob Ihr Würfel die richtigen Maße hat.

## Vasen, Töpfe und Tassen drucken

Viele Modelle sollen innen hohl ausgedruckt werden (siehe Abbildung 15.24). Diese Modelle sind an beiden Enden versiegelt und haben normalerweise Oberflächendetails, Muster oder andere Designs an der Außenseite. Sie sehen solide aus, sollen aber einwandig als Topf oder Vase ausgedruckt werden. Diese Designs erzeugen häufig eine optimale Oberflächenqualität, können aber nur für einwandige Objekte verwendet werden.

Slic3r besitzt eine spezielle Einstellung für zylindrische Versionen solcher Objekte. Mit dieser Einstellung ist ein so gut wie ununterbrochener Druck ohne Rückzug in den Extruder oder Rückstellbewegungen der Maschine möglich. Diese Einstellung heißt *Spiral Vase* (siehe Abbildung 15.25). Sie brauchen Zugriff auf den Expertenmodus von Slic3r. Dort wählen Sie den Modus SPIRAL VASE aus. Anschließend können Sie noch die Schichthöhe und die Anzahl der durchgängigen Bodenschichten festlegen. Slic3r entfernt automatisch die oberen Schichten für Sie, sodass Sie ein einwandiges Objekt mit solider Basis erhalten.

Noch beeindruckender bei solchen Ausdrucken ist, dass nach dem Ausdruck der soliden Bodenschichten der einwandige Umriss in einer einzigen Extrusion gedruckt wird, wobei

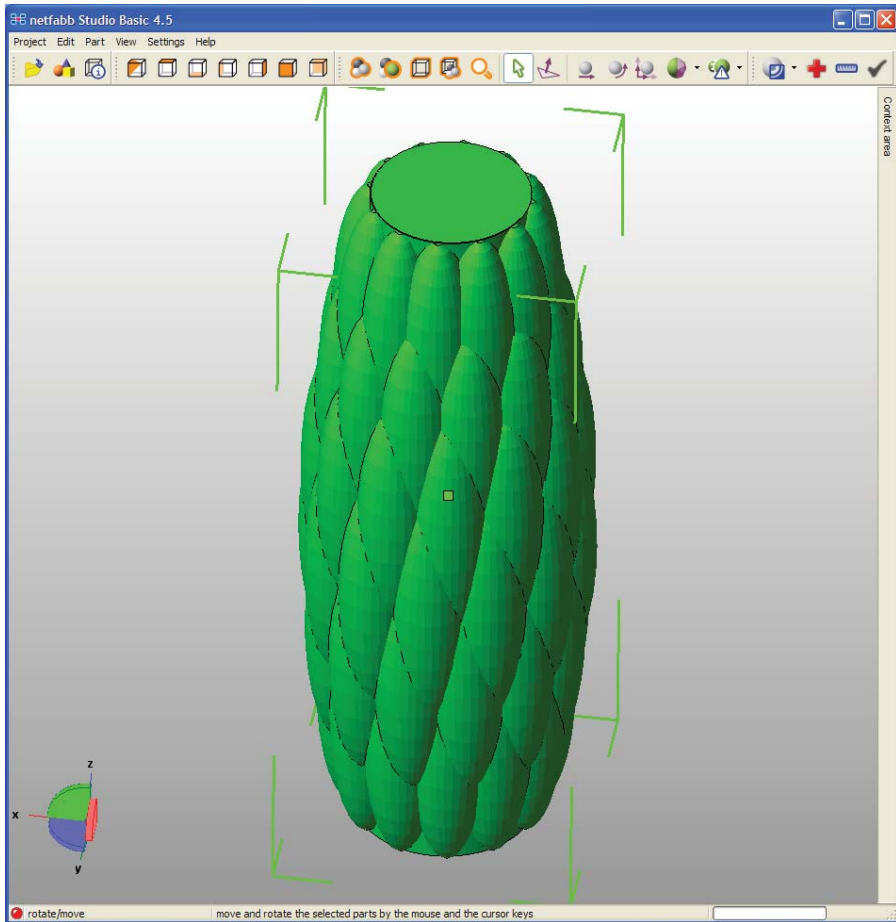


Abbildung 15.24: Ein Design für einen hohlen Topf

einfach nur Spiralen gedruckt werden, indem die Z-Achse kontinuierlich nach oben bewegt wird, während der Druckkopf immer wieder im Kreis fährt. Diese Bewegung kann den Druck sehr viel schneller machen und das fertige Objekt weist keine sichtbare Naht auf, weil der Extruderfluss nicht unterbrochen wird, um zur nächsten Schicht zu gelangen, wie es im Normalfall passiert.



Für einwandige Objekte, die mit der Einstellung SPIRAL VASE gedruckt werden, ist eine größere Düse gut geeignet. Sie können dennoch feine Schichten auswählen. Die breitere Düse erzeugt eine dickere Wand, wodurch Ihr gedrucktes Objekt stärker wird.



*Abbildung 15.25: Das hohle 3D-Modell, ausgedruckt als Spiral Vase, wobei die vertikale Z-Achse kontinuierlich nach oben gefahren wird, sodass ein nahtloser Druck entsteht*

## Große einteilige Objekte drucken

Große einteilige Objekte sind nicht so einfach zu drucken. Häufig (nicht immer) werden die Kanten eines großen Objekts beim Drucken wellig. Wenn Sie Teile drucken, die größer als 100 mm sind, erhalten Sie möglicherweise selbst dann Probleme, wenn Sie PLA verwenden und mit einem beheizten Druckbett arbeiten (wodurch diese Welligkeit eher unterdrückt wird). Aber die Verwendung von ABS für große Teile ist mit Sicherheit eine Herausforderung für die meisten privaten 3D-Drucker. Glücklicherweise gibt es in Slic3r einen Trick, der dieses Problem löst. Und vielleicht finden Sie diesen ja für alle anderen Teile, die Sie drucken, auch ganz praktisch.

Die Option Brim erzeugt auf der ersten Schicht eines Objekts einen horizontalen Ring mit einem Durchmesser, der größer als die Grundfläche des Objekts ist. Diese Option kann



praktisch sein, wenn das gedruckte Objekt auf Ihrer Grundplatte klebt oder wenn sich die Ecken eines Objekts während eines Drucks hochrollen.



Die Option Brim wurde hauptsächlich eingeführt, um dafür zu sorgen, dass große Objekte bei einem langwierigen Druck besser an der Grundplatte haften. Sie kann jedoch auch hilfreich sein, und manchmal sogar unverzichtbar, wenn Sie winzige Objekte drucken, die auf der ersten Schicht keine große Grundfläche haben. Der gedruckte Ring kann mit minimalem Aufwand von dem fertigen Objekt entfernt werden.

### **Winzige oder stark detaillierte Objekte drucken**

Wenn Sie sehr kleine Objekte drucken wollen, sollten Sie überlegen, ob Sie nicht viele davon gleichzeitig drucken. Bei diesem Ansatz kann jeweils eine Schicht für alle Teile gedruckt werden. Wenn beginnend beim ersten Teil die nächste Schicht gedruckt werden soll, konnte der Kunststoff der vorherigen Schicht bereits aushärten. Diese Technik hat jedoch einen Nachteil: Möglicherweise brauchen Sie das kleine Objekt nur einmal, und möglicherweise stellen Sie kleine Mängel an der Außenfläche der Objekte fest, wenn der Druckkopf von einem Teil auf ein anderes übergeht. Diese optischen Unregelmäßigkeiten spielen bei funktionalen Teilen eine geringere Rolle, aber wenn es sich um Modelle handelt oder wenn die Objekte ausgestellt werden sollen, brauchen Sie die bestmögliche Darstellung.

Um dieses Geschwindigkeitsproblem zu lösen, verlangsamen Sie einfach die gesamte Druckgeschwindigkeit. Es gibt aber noch eine bessere Option: Sie definieren in Slic3r eine Mindestdruckzeit pro Schicht. Im Expert-Modus wählen Sie `FILAMENT SETTINGS AND COOLINGS|ENABLE AUTO COOLING`. Möglicherweise finden Sie diese Einstellung so praktisch, dass Sie sie andauernd verwenden wollen. Lesen Sie weiter, dann erfahren Sie auch, warum das so ist.

Wenn wir eine Mindestschichtdauer definieren, erkennt Slic3r, dass es jede Schicht automatisch berechnen und auf die resultierende Geschwindigkeit verlangsamen muss. Das bedeutet, winzige Objekte werden automatisch langsamer gedruckt. Große Objekte brauchen ohnehin länger als die Mindestschichtdauer und werden deshalb nicht verlangsamt. Die automatische Abkühlung sorgt also dafür, dass Sie bei jedem Ausdruck die optimale Geschwindigkeit und Qualität erhalten.

Für einige Objekte ist das besonders wichtig. Ein gutes Beispiel ist eine Pyramide. Sie beginnt mit großen Schichten an der Basis und Sie können schnell drucken, weil die Schichten nach oben hin kleiner werden (und damit auch schneller zu drucken sind). Wenn Sie keine Mindestschichtdauer festlegen, sieht die Pyramide großartig aus, *bis* der Druck die Spitze erreicht hat. Dort wird das Ganze ruiniert, weil die winzigen Schichten sehr schnell gedruckt werden – es entsteht ein unansehnlicher Plastikklumpen statt einer definierten, kantigen Spitze. Wenn Sie eine Schichtdauer von ca. 15 Sekunden einstellen, wird der Druck automatisch verlangsamt, wenn er näher an die Spitze gelangt, und das Modell wird ordentlich ausgedruckt.



Objekte können ohne die oben beschriebene Verlangsamungsmethode sehr schnell ausgedruckt werden, aber es dauert eine gewisse Zeit, bis man beurteilen kann, ob diese Technik geeignet ist. Die allgemeine Vorgehensweise, um dieses Ergebnis zu erhalten, ist die Verwendung eines gerichteten Lüfters, um die Schichten unmittelbar nach dem Druck gezielt abzukühlen. Dieser Trick empfiehlt sich jedoch in der Regel nur für Materialien wie PLA und nichtbeheizte Druckbetten (unter Verwendung einer mechanischen Verbindung, wie etwa einem Klebeband, statt einer durch Wärme erzeugten Verbindung.)

## Viele Objekte gleichzeitig drucken

Nachdem Sie mehr Erfahrung mit dem 3D-Druck gesammelt haben, können Sie eine ganze Palette an Teilen gleichzeitig drucken. Dieser Ansatz verursacht normalerweise keine Probleme, aber es ist sinnvoll, die Funktion zum Anheben der Düse zu verwenden, wie bereits beschrieben. Das Anheben der Druckdüse unmittelbar vor einer Weiterbewegung ist sinnvoll, wenn Sie sehr viele Teile auf der Druckfläche haben. Damit wird die Wahrscheinlichkeit geringer, dass versehentlich ein Teil umgestoßen wird oder dass der Druckwagen seine Ausrichtung verliert.



Bei einigen Objekten und 3D-Druckern kann es sinnvoll sein, ein Teil um 45 Grad auf der Plattform zu drehen. Es ist auf diese Weise einfacher zu drucken, es wellt sich weniger und die Wahrscheinlichkeit wird verringert, dass bei einer Bewegung des Druckkopfs die Ecken oder Kanten von Teilen getroffen werden. Wenn ein Druck fehlschlägt oder Probleme verursacht, probieren Sie es mit einer solchen einfachen Drehung, oder platzieren Sie das Objekt auf dem Bett neu, bevor Sie die anderen Einstellungen ändern.

## Verbesserung der Druckqualität

Als Faustregel kann man sagen, dass eine Verlangsamung der Druckgeschwindigkeit ganz allgemein eine bessere Druckqualität erzeugt. Eine schnelle Bewegung kann die Druckqualität beeinträchtigen. Der Druckkopf bewegt sich schnell an eine neue Position und das schnelle Beschleunigen und Abbremsen kann manchmal unerwünschte Schatten und Artefakte auf dem Ausdruck verursachen. Experimentieren Sie ein bisschen mit der Maschinengeschwindigkeit, bevor Sie andere Einstellungen ändern.

Die Temperatur spielt eine wichtige Rolle für die Druckqualität. Insbesondere ist sie mit der Druckgeschwindigkeit und der Schichthöhe verknüpft. Allgemein können Sie davon ausgehen, dass für eine Verlangsamung der Druckgeschwindigkeit unter 20 mm/s auch die Drucktemperatur reduziert werden sollte.

Es gibt die unterschiedlichsten Gründe, langsam zu drucken. Vielleicht wollen Sie ein sehr kleines Objekt drucken oder ein Teil, das sich in der Vergangenheit als sehr kompliziert beim Ausdruck erwiesen hat. Die meisten Thermoplastmaterialien erzeugen auch ein gutes Ergebnis, wenn Sie die Temperatur weit unter die übliche Einstellung absenken. Eine

Reduzierung der Temperatur kann auch verhindern, dass überflüssiger heißer Kunststoff aus der Extruderdüse läuft. Daraus kann sich ein maßgeblicher Qualitätsunterschied beim langsamen Druck sehr detaillierter Teile ergeben. Sie haben damit einfach mehr Kontrolle über den extrudierten Kunststoff. Dieser Ansatz senkt im Allgemeinen auch den Druck in der Extruderdüse, wodurch die Druckqualität weiter verbessert wird.

Wenn Sie feststellen, dass Sie beim Ausdruck von mehreren Objekten gleichzeitig mehr Druckfehler erhalten, ist das oft ein Zeichen für ein geringfügiges Problem mit der mechanischen Ausrichtung. Überprüfen Sie, ob Ihre Riemen noch straff genug sind. Überprüfen Sie außerdem die Geschwindigkeit Ihres Druckwagens. Wenn Sie den Wagen zu schnell für den Rahmen Ihres 3D-Druckers bewegen, versuchen Sie, ihn zu verlangsamen. Wenn das nicht hilft, probieren Sie eine weitere Expert-Einstellung in Slic3r aus: AVOID CROSSING PERIMETERS. Diese Option bewirkt, dass der Drucker versucht, den Druckkopf immer an der Außenseite einer gedruckten Schicht zu bewegen, statt sich über das Objekt hin zu bewegen, um auf die andere Seite des Druckbetts oder zu einem anderen Objekt zu gelangen. Dadurch verlängert sich natürlich die Druckzeit, aber Ihr Druck wird qualitativ besser und zuverlässiger.



PLA wird bei Temperaturen von bis zu 160 Grad Celsius gedruckt, wenn Sie Teile langsam ausdrucken. Damit läuft auch weniger überflüssiger Kunststoff aus der Düse heraus und kleinere Teile können sehr viel detaillierter dargestellt werden. Aber selbst bei so niedrigen Temperaturen können Sie einen Lüfter einsetzen, um die Kunststoffschichten gezielt zu kühlen.

Damit sind wir am Ende Ihrer Reise in das Land des 3D-Drucks angekommen. Wir hoffen, wir haben Sie inspiriert und Sie bauen vielleicht sogar selbst einen RepRap-3D-Drucker.

*Teil VI*

## *Der Top-Ten-Teil*

# Der Top-Ten- Teil



Besuchen Sie uns doch einmal auf [www.facebook.de/fuerdummies!](http://www.facebook.de/fuerdummies!)

## ***In diesem Teil ...***

- ✓ Lernen Sie zehn Beispiele für additive Herstellung und Personalisierung kennen.
- ✓ Betrachten wir zehn Methoden der additiven Herstellung, die einen völligen Wandel für Unternehmen mit sich bringen werden, die heute eine traditionelle Fertigung anbieten.
- ✓ Beschäftigen wir uns mit zehn 3D-gedruckten Designs, die mit herkömmlichen Fertigungstechniken unmöglich wären.
- ✓ Übernehmen Sie Ideen aus diesen Konzepten, um sie in Ihren eigenen 3D-Druck-Projekten einzusetzen!

# *Zehn Möglichkeiten, wie das schnelle Prototyping die traditionelle Fertigung verändern wird*

16

**W**ichtige Änderungen passieren selten ohne Stress. Oder: Wo gehobelt wird, da fallen Späne. Die additive Fertigung bietet aufregende neue Möglichkeiten, verkürzt aber auch den Fertigungsprozess, auf dem die moderne Massenfertigung basiert. Damit öffnen sich neue Geschäftsbereiche, aber andere werden dafür verschwinden. Die Pioniere dieser Technologie profitieren bereits von ihren Vorteilen. Sie setzen sie beim schnellen Prototyping und der direkten digitalen Fertigung ein. Außerdem werden damit Objekte in kleinen Stückzahlen hergestellt, die ganz individuell gestaltet sein können. Einige Stückzahlen sind so klein, dass jeweils nur ein einziges Objekt hergestellt wird, wie beispielsweise ein medizinisches Implantat, das genau auf den Patienten abgestimmt ist. Ein großer Vorteil ist, dass man keine besonderen Werkzeuge dafür braucht wie bei traditionellen Fertigungsmethoden, wo eine entsprechende Herstellung viel zu teuer wäre.

Das alles hat dazu geführt, dass der 3D-Druck als additive Fertigungsmethode in vielen Bereichen Einzug gehalten hat. Aber je besser diese Technologie wird, desto größer ist auch ihr Potenzial, Bereiche des herkömmlichen Fertigungszyklus vollkommen zu verändern. Dieses Kapitel spricht zehn Aspekte an, wie die additive Fertigung diesen Zyklus verändern kann.

## *Schnelle Marktreife*

Die Ausstattung für die additive Fertigung kann vor Ort bereitgestellt werden, sodass Design-Upgrades zwischen den ersten Messungen und der endgültigen Produktimplementierung innerhalb eines sehr kurzen Zeitrahmens durchgeführt werden können. Heute kann ein neues Design in einer Planungssitzung beschrieben werden und noch am selben Tag als Prototyp für den Test erstellt werden, der dann elektronisch an die Produktion übertragen wird. Aktualisierungen während der Produktion erfolgen ganz einfach, indem ein neues, korrigiertes 3D-Modell an die Produktionssysteme übertragen wird – ohne dass irgendwelche Werkzeuge angepasst werden müssen, selbst wenn komplexe Geometrien und Hohlräume im fertigen Produkt vorhanden sein sollen. Die Zeiträume, um ein Produkt auf den Markt zu bringen, sind daher sehr viel kürzer und man braucht weniger Maschinenbediener, Werkzeugmacher oder erfahrene Vertriebsmitarbeiter, um Waren zu entwickeln und herzustellen.

## *Abschaffung der Massenproduktion*

Neue Produktversionen können global eingeführt werden. Dazu wird ein Standardmodell elektronisch an die Produktionsstandorte übertragen, die sich in unmittelbarer Nähe der



Verbraucher befinden. Es ist nicht notwendig, Produkte in einem Land zu entwickeln, die einzelnen Komponenten in anderen Ländern montieren zu lassen und die fertigen Teile dann zu den Kunden in aller Welt zu transportieren. Die additive Fertigung gestattet die direkte Fertigung immer komplexerer Endprodukte. Irgendwann wird es überhaupt nicht mehr erforderlich sein, Komponenten in Billiglohnländern herzustellen, wo wenig Wert auf eine sichere Produktionsumgebung gelegt wird. Selbst komplizierte Produktionen können vor Ort vorgenommen werden. Das gefährdet insbesondere die Industriebereiche, die weltweit in Massenfertigung produzieren.

## *Verschiebung des Transportsektors*

Die aktuelle Warenproduktion basiert auf langen Produktionszyklen. Die Objekte werden weltweit unter Einsatz riesiger Containerschiffe, die fossile Brennstoffe verbrauchen und durch giftige Emissionen Umweltschäden verursachen, von A nach B transportiert. Die in diesen gewaltigen Schiffen um die Welt transportierten Produkte werden in riesigen Häfen an den Landtransport übergeben. Lange Lieferketten waren immer schon empfindlich gegenüber Angriffen und Missbrauch. Heute gefährden regelmäßig Hacker und andere böswillige Organisationen die Lieferautomatisierung, um illegale Materialien zwischen die legalen Güter zu schmuggeln. Massenwaren werden in LKWs in Lagerhäuser transportiert, abhängig von regionalen und jahreszeitlichen Anforderungen, und die Produkte werden gelagert, bis sie in den Geschäften benötigt werden. Irgendwann werden die Produkte wieder per LKW an die Geschäfte verteilt, wo die Kunden sie kaufen und mitnehmen können. Es ist kaum zu übersehen, wie ineffizient ein solches System ist!

In Zukunft wird es so ablaufen, dass über die additive Fertigung immer komplexere Produkte hergestellt werden können. Die Kunden werden online auf die Website eines lokalen Herstellers gehen, ihre Produkte mit entsprechenden individuellen Anpassungen bestellen und sie dann auf dem Heimweg von der Arbeit einfach abholen. Damit ist es nicht mehr nötig, Massenwaren zu verschiffen, zu transportieren, zu lagern und in verschiedenen Durchgängen zu verteilen. Damit fällt ein Großteil der Umweltverschmutzung, des Verbrauchs fossiler Brennstoffe und der Kosten für die traditionelle Fertigung weg. Und wenn in großen Häfen und internationalen Drehkreuzen weniger Material abgefertigt wird, beispielsweise nur noch die Rohmaterialien für die Herstellungszentren, sind illegale Transaktionen schneller zu erkennen und können verhindert werden.

## *Verbrauch alternativer Materialien*

Die additive Fertigung gestattet die Verwendung anderer Materialien, als man sie aus der traditionellen Massenfertigung kennt. Thermoplast und Hybridmaterial können in granularer Form für das Laser-Sintering kombiniert werden. Unter Verwendung von Polymer-Bindungen können Materialien mit komplexen neuen Strukturen hergestellt werden, deren Materialbeschaffenheit unmittelbar geändert werden kann, abhängig davon, was gerade gebraucht wird (zum Beispiel Steifigkeit, Flexibilität oder Farbveränderungen). Wenn sich dieser Prozess als wirtschaftlich überlebensfähig erweist, müssen viele Industriebereiche, die derzeit Rohmaterialien für den traditionellen Fertigungsprozess liefern, sich auf neue Materialien

umstellen, weil ihr altes Angebot nicht mehr nachgefragt wird. Ein 3D-gedrucktes Haus beispielsweise benötigt keine Holzprodukte, Gipsplatten, Glasfaserisolierung, Asphaltbeläge und so weiter mehr, da sie durch spezielle Betonmischungen, Styropor-Granulate und andere Materialien ersetzt werden.

## *Geringerer Materialbedarf*

Einige Rohmaterialien bleiben unverändert, weil beispielsweise ein Hammer aus Metall sehr viel stabiler ist als ein Hammer aus Kunststoff. Allerdings erlaubt die additive Fertigung die Herstellung von Objekten, die strukturelle Hohlräume aufweisen und für die auch anderweitig Material eingespart werden kann – und die dieselbe Stärke aufweisen wie gegossene oder gefräste Festkörper-Äquivalente. Materialien, die mit neuen additiven Fertigungstechniken erstellt werden, können eine stabile Außenschicht mit einem porösen Material füllen, ähnlich wie die Knochen von Vögeln aufgebaut sind. Die Hohlräume dieses porösen Materials können mit Kühlmittel (oder einfach Luft) gefüllt werden. Es wird somit weniger Metall benötigt, um beispielsweise denselben Motorblock oder denselben Werkzeugkopf herzustellen.

## *Umweltfreundlichkeit*

Die poröse Innenstruktur sorgt nicht nur dafür, dass weniger Material für die Fertigung benötigt wird, sondern reduziert auch das Gewicht des Endprodukts. Fahrzeuge, die unter Verwendung solcher Strukturen gebaut werden, benötigen weniger Treibstoff für denselben Betrieb. Der Umweltschutz manifestiert sich jedoch nicht nur durch den reduzierten Treibstoffbedarf. Der Schlüssel für die Verbesserung ist die Verkürzung des Transportzyklus. Änderungen der Materialanforderungen gestatten außerdem die Nutzung umweltfreundlicherer Materialien, wie etwa dem pflanzlichen PLA-Kunststoff anstelle von herkömmlichen, auf Erdöl basierenden Polymeren – vorausgesetzt, die Abwägung zwischen Umweltkosten und Strukturqualitäten ist günstig. Materialien wie Beton, die für den Hausbau verwendet werden, können wiederverwendet und neu zusammengesetzt werden, womit ein Recycling aller Strukturelemente beim Bau möglich wird und das in einem Ausmaß, das nicht möglich ist, wenn ein Haus aus komplexen Kombinationen wie Holz, Glas und anderen Materialien besteht. Selbst Materialien wie Sand und andere lokale Ressourcen – warum nicht Mondgestein? – werden bald schon unter Verwendung von Sonnenenergie zu Strukturen geformt werden, sodass lokal vorhandene Ressourcen zu nützlichen Endprodukten gemacht werden können. Wenn das Ganze Schwung aufgenommen hat, werden damit Gewerbe wie Schreinereien und Dachdecker verschwinden, ebenso wie die Industriebereiche, die Rohmaterialien für den traditionellen Bau geliefert haben – Gipswerke, Sägewerke, Asphalt- und Teerhersteller und selbst Ziegeleien und Maurerunternehmen.

## *Verschleiß vermeiden*

Die Möglichkeit, neue Teile selbst für alte Geräte und veraltete Designs auszudrucken, gestattet die stetige Wiederverwendung vorhandener Gegenstände, ohne dass ein Ersatz gebraucht wird.

Die Fähigkeit, Kopien von vorhandenem geistigen Eigentum herzustellen, nachdem deren Patentschutz weggefallen ist, bedeutet auch, dass Sie ohne Weiteres Ihren geliebten Shelby Mustang aus den 60-er Jahren wieder fahren können – oder ihn komplett ersetzen können, wenn das Original verschlissen ist. Die aktuelle Massenproduktion ist von einer geplanten Veralterung abhängig, die die Menschen zwingt, alte Dinge auszutauschen, wenn sie verschlissen sind, weil Reparaturen immer schwieriger und kostspieliger werden, weil Ersatzteile für alte Designs selten sind. Heute werden bereits Ersatzteile auf 3D-Druckern hergestellt, beispielsweise für Musikinstrumente und alte Autos, aus Kunststoff, Holzmischungen und sogar Metall. Und manchmal sind diese Ersatzteile stabiler als die Originalteile. Dies wird sich auf Industriebereiche auswirken, die heute Geschäfte mit dem Wiederverkauf alter Produkte und ihrer Ersatzteile machen, ebenso wie auf Industriebereiche, die permanent einen Ersatz für Produkte verkaufen, nachdem diese wie geplant verschlissen sind.

## *Wegfall der Universalanfertigungen*

Der Massenproduktion begegnet man überall dort, wo viele Menschen zusammenkommen oder in einem Raum beisammensitzen. Die Hälfte davon trägt weiße Kopfhörer ihrer neuesten i-Produkte. Und selbst zwischen völlig Fremden können spontan Gespräche über die Beschaffenheit der neuesten Gehäuse, die Vorteile von Android gegenüber iOSx oder die neuste Tablet-Größe entstehen. Wir sind gefangen in einem ständigen Wettrennen, verursacht durch die geplante Lebensdauer der Produkte und weil jeder immer mit seinem Nachbarn mithalten will. Die traditionelle Massenproduktion kann auf diese Weise Millionen identischer Teile verkaufen, sobald das neueste Produktupdate auf den Markt gebracht wird.

Durch 3D-gedruckte Gehäuse und anderes Zubehör ist bereits eine gewisse Personalisierung von einzelnen Teilen möglich. Wenn die Technologie so weit ausgereift sein wird, kann sich jeder bald das ganze Telefon 3D-ausdrucken lassen oder zumindest eine Hülle für die Elektronik des Telefons, angepasst an die individuellen Vorstellungen des jeweiligen Besitzers.

Diese Form der Personalisierung ist in einigen Anwendungen unabdingbar, wie beispielsweise bei medizinischen Implantaten (siehe Abbildung 16.1) und Prothesen, aber durch die additive Fertigung wird sie irgendwann für jedes beliebige Produkt möglich. Möchten Sie, dass Ihr Auto aussieht wie das Maskottchen Ihrer Schule, oder soll das Gesicht eines angesagten Schauspielers Ihr Gästehaus zieren? Sie erstellen einfach mit einer Software für die 3D-Modellierung ein Design und drucken es Ihren Anforderungen entsprechend aus (vorausgesetzt natürlich, Sie verfügen über eine entsprechende Lizenz). Und hätte es in der Welt des *Herrn der Ringe* schon 3D-Drucker gegeben, hätte dank der additiven Fertigung im Hobbit-Haus von Bilbo Beutlin ein Raum angefertigt werden können, der ausreichend hoch für Gandalf gewesen wäre.

Planung und Marketing für Massenwaren müssen sich anpassen. Man wird nicht mehr nach dem neuesten Modell für das nächste Jahr streben. Das neue Schlüsselwort lautet Personalisierung. Sie können Ihre vorhandenen Objekte aufrüsten oder austauschen, damit sie zu Ihrem Urlaub, zu der aktuellen Jahreszeit oder zu Ihrem regionalen Umfeld passen, oder einfach, damit sie in Ihre Hand passen, wenn Sie einen Verband und eine Schiene tragen, weil Sie sich beim Kegeln am letzten Wochenende verletzt haben.

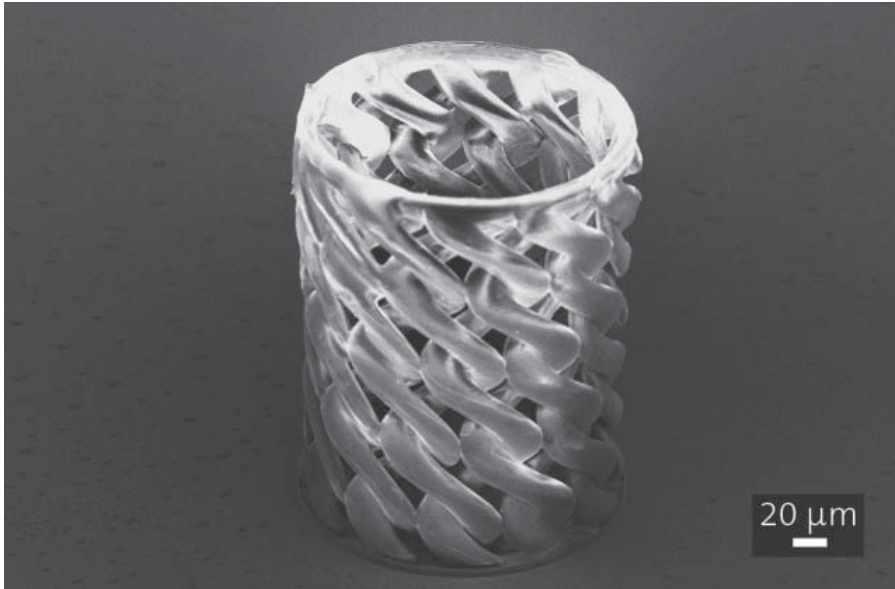


Abbildung 16.1: Ein winziger Stent, angefertigt für einen ganz bestimmten Patienten, zu dessen Blutgefäßen er passt (Bild mit freundlicher Genehmigung von NanoScribe)

## Herstellen, was Sie wollen

Neben einer einfachen Personalisierung können Sie das Potenzial des 3D-Drucks auch nutzen, um völlig neue Kreationen und Designs anzufertigen. Wo der Farbdrucker am PC plötzlich die Schreibkraft, den Setzer, den Drucker und den Beleuchter ersetzt hat, die früher nötig waren, um ein Buch zu drucken, gestattet heute der private 3D-Drucker jedem Anwender, seine eigene Weihnachtsdekoration zu drucken, Partyzubehör oder sogar Roboter, ohne dass er über ein vertieftes Wissen über Formguss, Spritzguss oder die anderen Handwerkstätigkeiten verfügen muss, die bisher notwendig waren, um diese Aufgaben zu erledigen. Es gibt zahlreiche Online-Werkzeuge, mit denen Sie eine grobe Skizze anfertigen und diese in ein Design umwandeln können. Dieses können Sie dann zuhause aus Kunststoff herstellen (oder online in Metall oder Keramik bestellen). Und dazu sind nur ein paar Mausklicks nötig. Der einzige begrenzende Faktor ist heute Ihre Kreativität. Außerdem können viele Komponenten automatisiert angefertigt werden. Beispielsweise könnte ein Hochzeitspaar seine goldenen Eheringe mit seinen Vornamen versehen, ohne dass es einen Goldschmied (oder auch nur einen Verkäufer im örtlichen Schmuckgeschäft) braucht. Mit diesen Werkzeugen kann sich jeder seine ganz persönlichen Träume erfüllen. Die herkömmlichen Geschäfte, die bisher entsprechende Services anboten, werden dadurch verdrängt. Heute braucht man Services, die elektronische Designs in Festkörper umwandeln. Und dabei kann es sich um einen personalisierten Ehering ebenso wie eine Tortenaufgabe aus Marzipan handeln, die das Glück der beiden ganz in Farbe zeigt – oder auch die Sturmtruppen des Imperiums oder irgendwelche Fabelwesen. Alles kein Problem.

## *Alles, was man zum Leben braucht*

Neben den 3D-gedruckten Tortenauflagen aus Marzipan für eine Hochzeit werden heute auch ganz andere Designs getestet, die irgendwann auch den gesamten Kuchen ausdrucken. Die Forschung in der Lebensmittelkonservierung geht heute über das Einmachen und Einlegen hinaus und nähert sich langsam dem an, was wir aus den Science-Fiction-Filmen kennen. Pulver und Pasten können gemischt und innerhalb weniger Minuten zu einer nahrhaften und wohlschmeckenden Mahlzeit zubereitet werden. Und die Grundmaterialien dafür können jahrelang gelagert werden. Die Forschung im Bereich der Bioprinter befasst sich nicht nur mit der Erstellung neuer Körperteile für den Fall, dass wir altern oder verletzt werden, sondern auch damit, wie direkt tierisches Muskelgewebe hergestellt werden kann, das bereit für den Grill ist. Von 3D-gedruckten Steaks, für die keine Tiere mehr gehalten werden müssen, bis hin zu 3D-gedruckten Pizzas, die verzehrbereit aus dem Drucker kommen, ist wirklich alles möglich – sobald wir geeignete Materialien und Drucker entwickelt haben werden. Wir sehen einer Zeit entgegen, in der viele der herkömmlichen Unternehmen verschwinden werden, die bisher in der Produktion, Lagerung und Zubereitung von Lebensmitteln tätig waren.

Und der Ausdruck neuer Körperteile, wie beispielsweise auch von Muskeln und anderem Gewebe, die zum Teil sogar besser sind als das, was uns die Natur ursprünglich mitgegeben hat, kann ebenfalls völlig neue Unternehmensbereiche schaffen. Wir können womöglich auf dem Heimweg von der Arbeit in einer Klinik vorbeifahren und uns moderne neue Wangenknochen einsetzen lassen, oder uns spezielle Medikamente herstellen lassen, die genau für unseren Bedarf produziert werden. Wir brauchen dazu natürlich noch die Rohmaterialien, aber die Branchen, die derzeit Services für Körper und Gesundheit anbieten – oder Produkte verkaufen, die unseren Körper oder unsere Gesundheit verbessern sollen –, werden in den kommenden Jahren mit Sicherheit einem Wandel unterliegen.

# *Zehn Beispiele für direkte digitale Herstellung und Personalisierung*

# 17

**D**ie additive Fertigung ist keine futuristische Technologie. Es gibt sie bereits in vielen verschiedenen Industriebereichen, von medizinischen Implantaten bis hin zu Flugzeugtechnologien. Ursprünglich wurde die additive Fertigung für ein schnelles Prototyping entwickelt, aber sie wurde immer mehr in die direkte digitale Fertigung von Verbrauchsprodukten und Waren übernommen. Mit zunehmenden Optionen für das verwendete Material und der neuen Komplexität von 3D-gedruckten Objekten, die selbst die Herstellung von integrierten Schaltungen und erweiterten Strukturdesigns ermöglichen, kann ein breiteres Spektrum an Produkten direkt aus Elektronikdateien und Rohmaterialien hergestellt werden. Dieses Kapitel beschreibt zehn Beispiele für diese Art der direkten digitalen Fertigung.

## *3D-gedruckte Lebensmittel*

Die Cornell Universität und andere Forschungseinrichtungen beschäftigen sich mit 3D-gedruckten Lebensmitteln, wie beispielsweise Gemüsewaffeln und Fleischpasten. Finanziert von der NASA arbeitet ein kleines Unternehmen in Austin (Texas) derzeit an einem 3D-Drucker, der aus lang haltbarem Pulver, aufgelösten Ölen und Wasser 3D-gedruckte Pizzas erzeugt, die beim Ausdruck auf einer geheizten Druckplatte fertig gebacken werden. Die Astronauten der Zukunft werden solche Systeme nutzen, um auf ihren langen Reisen zum Mond, zum Mars und darüber hinaus ihre Nahrung zuzubereiten. Andere Forscher beschäftigen sich mit im Labor gezüchteten Fleischzellen, um 3D-gedruckte Hamburger und Steaks zu schaffen, für die keine Tiere gezüchtet und gefüttert werden müssen. Wenn diese Entwicklung erfolgreich ist, können Reisende und Forscher unterwegs praktisch versorgt werden, und die Eiweißaufnahme bleibt auch gesichert, wenn es keine Bauernhöfe und kein Weideland gibt. Die Studenten an der Cornell Universität drucken bereits individualisierte Kuchen und Fingerfood aus den unterschiedlichsten Materialien aus.

## *Druck von Gewebe und Organen*

Neben den einfachen biologischen Materialien für den 3D-Druck von Muskelgewebe und Nahrungsmitteln werden auch Bioprinter für die additive Fertigung entwickelt, mit denen komplexe Zellgebilde hergestellt werden, die zu funktionierenden Organen und Ersatzgewebe für Menschen aufgebaut werden können. Ein Vorteil dieser Designs ist, dass sie die eigenen Zellen des Empfängers verwenden, sodass dieser nicht sein Leben lang Medikamente gegen die Abstoßung des Transplantats einnehmen muss. Der aktuelle Stand der Technik gestattet die Herstellung von einfachen Organen. So konnte beispielsweise einem Umfeld erzeugt werden, in dem Blasenzellen wachsen können. Die ersten Beispiele für komplexe kritische



Organe werden derzeit getestet, wie beispielsweise Leberzellen. Kleine 3D-gedruckte Organe unterschiedlicher Art werden derzeit für den Test neuer Medikamente und Behandlungen außerhalb von lebenden Organismen eingesetzt.

### Biologische Repliken

Bis Bioprinter echte Ersatzgewebe für den Menschen herstellen können, spielt der 3D-Druck eine andere wichtige Rolle in der Medizin: Er gestattet die Herstellung von Prothesen und Implantaten, die präzise dem fehlenden Körperteil (oder funktionalen Körperteilen) nachgebildet werden, um einen individuellen Ersatz zu schaffen. Die Zeiten der Holzbeine und Metallhaken für fehlende Gliedmaßen sind endgültig vorbei. Die Prothetik kann durch den 3D-Druck nicht nur einen funktionalen Ersatz schaffen, sondern auch einen künstlerischen Ausdruck, der die Persönlichkeit des Trägers widerspiegelt. Derzeit ist es noch nicht möglich, fehlende Körperteile durch voll funktionale biogedruckte Teile zu ersetzen, aber die nichtbiologischen Alternativen können Implantate erzeugen, die in vorhandene biologische Strukturen einwachsen können – was bereits eine Verbesserung gegenüber der Vergangenheit darstellt.

### Herstellung von Kleidung und Schuhen

Auch in der Textil- und Schmuckindustrie wird der 3D-Druck noch für manche Neuerung sorgen. Beispielsweise könnte damit Sportkleidung hergestellt werden, die leichter ist und dem Sportler eine bessere Beweglichkeit gestattet. Oder es kann spezielle Kleidung hergestellt werden, die genau auf die Körpermaße des Trägers zugeschnitten ist (siehe Abbildung 17.1). Und selbst wenn zwei Menschen dasselbe Kleid tragen, würde es an jeder Person völlig unterschiedlich aussehen. Das Potenzial für benutzerdefiniert hergestellte (und nicht nur

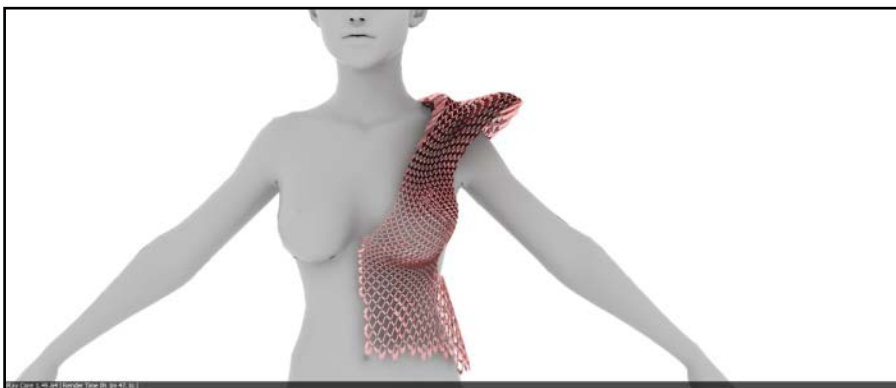


Abbildung 17.1: Für das Kleid von Dita von Teese wurde das Design ihren Maßen genau angepasst.  
(Bild mit freundlicher Genehmigung des Francis Bitonti Studio; Designer: Michael Schmidt;  
Architekt: Francis Bitonti)

maßgeschneiderte) Kleidung wurde bereits in vielen Science-Fiction-Filmen genutzt, wird aber heute immer mehr zur Realität. Man nutzt Materialien, Farben und Designs, die der Träger ganz unabhängig auswählt, abhängig von seiner Stimmung, seinen Vorstellungen oder der Gelegenheit, zu der er etwas anziehen möchte. Die Markenkennzeichnung wird dann weit über ein gesticktes Krokodil auf einem T-Shirt hinausgehen und sich in jedem Aspekt des Designs ausdrücken.

## *Personalisiertes Kunsthandwerk*

Einer der ersten Verwendungszwecke kleiner 3D-gedruckter Objekte war die Herstellung von personalisierten Kunststoffohrringen und entsprechendem Zubehör. Heute werden damit fantastische Kreationen erstellt, die die Schönheit der Mathematik in greifbare Formen umwandeln, und dies aus wertvollen Metallen, die genau den Vorlieben des Trägers oder den Anforderungen des Designers entsprechen. Kunststoffkomponenten werden verwendet, um Schaubilder ganzer Räume in voller Größe zu schaffen oder riesige Kunstprojekte unter Beteiligung und mit den Vorstellungen verschiedener Künstler, die alle an der Herstellung beteiligt werden können. Von kleinen Modeartikeln, die als Schmuck getragen werden, bis hin zu Designs für Möbel und öffentliche Ausstellungen schafft das 3D-gedruckte Kunstgewerbe bereits völlig neue Möglichkeiten für Designer, ihre Arbeiten zuhause anzufertigen und ihre Träume in die Realität umzusetzen, wozu sie früher einfach nicht in der Lage gewesen wären.

## *Hollywood wird noch spektakulärer*

Schon immer haben Modellbauer Kulissen und Requisiten für Filmproduktionen hergestellt, aber mit dem Potenzial des 3D-Drucks ist es möglich geworden, ein Kostüm direkt für einen bestimmten Schauspieler herzustellen. Ein Beispiel dafür ist etwa das wunderbare Iron Man-Kostüm von Tony Stark, das genau für die Maße des Schauspielers Robert Downey Jr. angefertigt wurde – dank der Magie des 3D-Drucks. Und als Hollywood den klassischen 1964 Aston Martin DB5 von James Bond sprengen wollte (komplett mit Nummernschild BMT 216A), der aus der Zeit stammte, als Sean Connery die Rolle noch spielte, hat man das Originalauto (4,6 Millionen Dollar) verschont. Stattdessen sprang ein 3D-gedrucktes Stunt-Double ein. Kostümbildner kreieren für Schauspieler und Schauspielerinnen Gewänder aus transparenten Materialien – beispielsweise Rüstungen aus glänzenden Komponenten, die genau wie Metall aussehen, aber bei Weitem nicht so schwer wie echtes Metall sind, oder Kostüme mit integrierter Beleuchtung, um noch mehr Illusion zu schaffen. Der Einsatz dieser 3D-gedruckten Fantasiegebilde steht noch ganz am Anfang.

## *Baukörper erstellen*

3D-gedruckte Kunst muss sich nicht auf das Kunstgewerbe beschränken. Vielmehr können ganze Strukturen geschaffen werden, die groß genug sind, dass man darin wohnen kann. Unter Verwendung von natürlichen Rohmaterialien wie Sand und Mondgestein können

wir damit unsere Erkundung neuer Welten unterstützen oder Wohnräume und Satelliten direkt im Weltall herstellen – aus Material, das wir auf Asteroiden und anderen Quellen finden, die im Sonnensystem im Überfluss vorhanden sind, statt Material unter höchstem Aufwand in das Weltall transportieren zu müssen. Irgendwann können ganze Häuser an Ort und Stelle gedruckt werden. Derzeit werden bereits 3D-gedruckte Betonmodule verwendet, um abgetragene Riffs und andere beschädigte Elemente unseres Ökosystems zu reparieren. Forscher an der Universität von Washington sowie in Europa testen bereits Systeme mit sehr großen Druckern, sodass ganze Gebäude damit angefertigt werden können. Andere Künstler beschäftigen sich damit, wie man unsere Möbel, unser Geschirr und sogar Keramik oder Glas und selbst die einfachsten Haushaltsgegenstände zu personalisierten Kunstwerken erheben kann. Fans der Videospielserie *Portal* beispielsweise können ganz einfach Kaffeetassen in Form eines Begleiter-Kubus aus dem Spiel entwerfen. Und unter Verwendung von Säulenaufsätzen aus Holzverbundstoffen – oder auch größeren Objekten, wie etwa Beistelltischen – kann mithilfe der bereits heute verfügbaren Technologie unsere Wohnumgebung nach demselben Thema ganz individuell gestaltet werden.

## **Der Himmel ist nicht genug**

In der Luftfahrt können hochleistungsfähige Turbinen und Düsenmotoren in einem Stück ausgedruckt werden, statt diese wie bisher aus kleineren Komponenten zu montieren. Ein Vorteil dabei ist, dass diese 3D-gedruckten Objekte nicht die Schwachstellen aufweisen, die durch die Zusammensetzung einzelner Komponenten entstehen können. General Electric nutzt diese Möglichkeit bereits, um Werkteile während der Produktion anzupassen, indem einfach die Designdatei abgeändert wird, mit der Düsenmotorkomponenten hergestellt werden. Und die NASA testet derzeit 3D-gedruckte Raketendüsen und andere Komponenten, die hohen Druckwerten unterliegen, um unserer ambitionierten Luft- und Raumfahrt zu ermöglichen, »über die sicheren Bande der Erde hinüberzugleiten«, wie John Magee es in seinem Gedicht »Hoher Flug« beschrieben hat. Bereits heute engagiert sich die Privatwirtschaft zusammen mit den Regierungen bei der Erkundung des Weltalls, und der 3D-Druck gestattet ihnen, alles was sie brauchen, aus den Materialien herzustellen, die sie auf ihrer Reise vorfinden.

## **Roboterbau**

Die Automatisierung und die Robotik machen die Welt zu einer höchst interaktiven und selbstgesteuerten Umgebung. Fabriken, die einst mit Hunderten von Arbeitern gefüllt waren, die gefährlichen Arbeitsbedingungen ausgesetzt waren, sind heute automatisiert und werden von den Bedienern von relativ sicherer Position aus ferngesteuert. Bei den Werkzeugen handelt es sich oft um speziell angefertigte Designs. 3D-Drucker bieten heute dasselbe Potenzial für einzelne Hersteller und Designer, die gerade erst anfangen, sich mit Robotik zu beschäftigen, oder die kleine Stückzahlen ganz spezieller Roboter für einen bestimmten Zweck herstellen, die für eine kommerzielle Produktion in großen Unternehmen nicht infrage kommen. Komplexe Verknüpfungen und Verbindungen zwischen den Komponenten können mithilfe von 3D-Druckern ganz einfach hergestellt werden. Es ist völlig unkompliziert, Halterungen

oder andere Elemente einzeln herzustellen, und dies genau in dem Moment, in dem sie gebraucht werden. Auf diese Weise können ganz einfach neue Innovationen hinzugefügt und getestet werden, um die Funktionalität der Roboter zu erweitern, wenn eine neue Aufgabe dafür entsteht.

## 3D-Drucker drucken

Neben der grundlegenden Robotik machen es die 3D-Drucker heute möglich, weitere 3D-Drucker herzustellen. Dazu verwendet man einfache Robotersteuerungen und -gelenke in Kombination mit speziell angefertigten Halterungen und ganz normaler Standardhardware. Als 2006 die grundlegenden Patente für die FDM/FFF-Thermoplast-Extrusion ausliefen, wurde der Welt das RepRap-System (Self-REplicating RAPid Prototyping) von Dr. Adrian Bowyer als Open Source-Design vorgestellt – und damit eine Funktionalität, die einst nur in Laboren und professionellen Fertigungseinrichtungen zur Verfügung stand, und das Ganze in einem Gerät, das weniger als die ersten Laserdrucker kostet. Heute findet man RepRaps unterschiedlichster Designs und Varianten in Produktionsumgebungen, Schulen und sogar in Geschäften für Bürobbedarf. Sie gestatten, wiederum viele der Komponenten für weitere Drucker herzustellen, wozu kostenlos online verfügbare Open Source-Designs verwendet werden.

Und es warten weitere Möglichkeiten auf ihre Verwirklichung, wenn in den nächsten Jahrzehnten weitere Patente ablaufen. Die ursprüngliche SLA-Technologie (Stereolithografie) steht heute nicht mehr unter Patentschutz und wird in Systemen wie dem Form 1 eingesetzt – der bereits in Produktionsumgebungen für hochauflösende Ausdrücke unter Verwendung von Fotopolymeren eingesetzt wird. SLS-Patente (Selective Laser Sintering) laufen 2014 ab, womit sich völlig neue Welten für Unternehmen und private Anwender ergeben, und womit eine personalisierte Fertigung aus Kunststoffen, Metallen, Keramik und anderen Granulaten möglich wird.

Für das Sintering sind einige zusätzliche Dinge erforderlich, die den allgemeinen Gebrauch noch einschränken, wie beispielsweise Vorrichtungen für den Umweltschutz, spezielle Gase und leistungsfähige Laser, für die wiederum spezielle Gehäuse benötigt werden, um die Benutzer zu schützen. Eine Sintering-Einrichtung ist heute komplizierter, aufwändiger und teurer als ein FDM/FFF-Thermoplastdrucker, aber die Community hinter dieser Forschung kann auf der ständig zunehmenden Do-it-Yourself-Bewegung und der enormen Kreativität der dort bereits heute vorhandenen Open Source-Designs aufbauen.



# *Zehn unmögliche Designs, die mit der additiven Fertigung geschaffen wurden*

# 18

Viele der durch die additive Fertigung möglich gewordenen Designs waren mit herkömmlichen Fertigungstechnologien einfach »unmöglich«. Und wenn nicht unmöglich, dann zumindest so teuer und schwierig, dass ihre Herstellung nicht vertretbar war. Dieses Kapitel beschreibt zehn Designs, die Sie nur mit der additiven Fertigung schaffen können.

## *Personalisierte Objekte*

Für die Geburtstagsparty seiner Tochter erstellte Kirk kleine Pfeifen als Geschenke, die die Initialen des Empfängers trugen. Für zwei Mädchen, die noch spontan eingeladen worden waren, konnte er die beiden letzten Pfeifen anfertigen, während die Kinder draußen noch spielten. Details wie Seriennummern oder kleine Spinnen (siehe Abbildung 18.1) können ganz einfach in die Designdatei aufgenommen werden, sodass jedes gedruckte Objekt seine eigene Identität erhält, mit der es sich von allen anderen abhebt.

## *Medizinische Implantate*

Anders als herkömmliche Implantate, die Standardstangen und andere einstellbare Komponenten verwenden, können 3D-gedruckte Implantate genauso entworfen werden, dass sie genau an die Körpermaße des Empfängers angepasst sind. Ein weiterer Vorteil ist, dass solche Objekte mit komplexen Innenmustern erstellt werden können, wie beispielsweise einem trabekulären Gitter, das gestattet, dass Knochengewebe direkt in das Implantat einwächst (ein Prozess, der als *Osseointegration* bezeichnet wird). Das künstliche Hüftgelenk verbindet sich also mit den natürlichen Geweben des Patienten und kann zu einem Körperteil werden, ohne dass es mit Schrauben oder anderen mechanischen Teilen befestigt werden muss (die das Gewebe verschleifen und langfristig weitere Schäden an den Knochen verursachen).

## *Selbstreplizierende Roboter*

Mithilfe von 3D-Druckern können neue Designs für Roboter-Insekten erstellt werden, die direkt aus dem Drucker an ihrem Einsatzort ausgespuckt werden. Die traditionellen Äquivalente mussten in mehreren Schritten montiert werden, bevor sie eingesetzt werden konnten. Ihre 3D-gedruckten Verwandten werden unter Verwendung einer automatisierten Fertigungseinrichtung erzeugt werden.





*Abbildung 18.1: Diese Gitarre wurde mit einem einzigartigen Spinnen- und Netzmotiv angepasst, um genau die Wünsche des Kunden zu erfüllen.  
(Bild mit freundlicher Genehmigung von Olaf Diegel)*

## **Gedruckte Flugzeuge**

3D-gedruckte Flugdrohnen gestatten die Herstellung von Aufklärungssensoren vor Ort, um Informationen beispielsweise in Katastrophengebieten oder in militärischen Krisenregionen zu sammeln. Diese Drohnen sind leichter als ihre traditionell gefertigten Äquivalente, weil ihre bauliche Stärke nicht von einer massiven Bauform abhängig ist. Diese Gewichtsreduzierung ermöglicht, dass aus derselben Menge Rohmaterial sehr viel mehr Drohnen hergestellt

werden, die jeweils eine sehr viel größere Reichweite unter Verwendung derselben Kraftstoffmenge aufweisen. Airbus und andere Hersteller hoffen, dieselbe Effizienz für ihre großen Flugzeuge nutzen zu können, nachdem die 3D-Drucker in der Lage sein werden, ganze Passagiermaschinen zu drucken.

## *Herstellung nach Bedarf und vor Ort*

Das US-amerikanische Militär hat 3D-Fertigungseinrichtungen entwickelt, die in einen Standardcontainer passen, sodass sie für eine schnelle Fertigung und als Testlabor an Truppen im Kampfeinsatz geliefert werden können. Diese kompakten und doch vollausgerüsteten Einrichtungen gestatten, Lösungen vor Ort in begrenzten Mengen zu entwickeln, zu testen und herzustellen. Die eigentliche Herstellung kann dann am Stützpunkt unter Verwendung der getesteten elektronischen Designs erfolgen, die direkt von dem Testmodul übertragen werden. Die Endbenutzer können auf diese Weise neue Designs oder erforderliche Änderungen entwickeln, ohne ihren Standort verlassen zu müssen.

## *Benutzerdefinierte Objekte im Weltraum herstellen*

Für additive Fertigungstechniken wie etwa FDM/FFF ist keine Schwerkraft erforderlich, um die einzelnen Schichten anzubringen, sie können deshalb auch auf dem Kopf stehend oder in Mikroschwerkraft-Umgebungen wie der Erdumlaufbahn auf der ISS (International Space Station) eingesetzt werden. Die NASA entwickelt derzeit eine Variante des Elektronenstrahl-Schweißens, wobei Metalledraht im Vakuum zu Objekten geformt wird. Durch diese Entwicklung werden zukünftige Astronauten ohne Ersatzteile für alle ihre Werkzeuge, die sie für ihre Erkundungsreisen brauchen, in den Weltraum reisen – sie brauchen einfach nur einen 3D-Drucker, der Ersatzteile ausdrucken kann.

## *Gedrucktes Finger-Food*

Ein weiteres Beispiel aus der Raumfahrt, das unter Verwendung von 3D-Druckern getestet wird, sind gedruckte Lebensmittel, die die Eintönigkeit der langen Reisen im Weltall unterbrechen sollen. Dieses »Finger-Food« kann in künstlerischen Designs ausgedruckt werden, die gleichzeitig nahrhaft für die Astronauten sind. Aktuelle Designs werden derzeit mit Materialien getestet, die jahrelang gelagert werden können – unabdingbar für die Vorbereitung von Stützpunkten für unsere zukünftigen Forscher.

## *Vor Ort hergestellte Objekte*

Das Design des Solar Sinters von Markus Kayser sowie aktuelle Arbeiten des Jet Propulsion Laboratory der NASA (JPL) – oder an EU-Standorten für Raumfahrttechnologie – demonstrieren die Fertigung ganzer Objekte, für die nur vor Ort vorhandenes Material und Sonnenlicht

verwendet wird. Ob es sich bei diesen gedruckten Objekten um Glasschalen aus Sand handelt oder um Baukörper aus vorhandenem Gesteinsmaterial – diese Technologien stellen eine der »reinsten« Formen umweltfreundlicher Entwicklung dar. Die Endprodukte können nach dem Gebrauch einfach wieder in ihren natürlichen Zustand umgewandelt werden, ohne dass dafür Chemikalien oder Kraftstoff erforderlich ist.

## **Körperteile**

Einer der vielleicht erstaunlichsten Bereiche »unmöglicher« Designs, die mit dem 3D-Druck möglich werden, und die mit der traditionellen Fertigung niemals hätten umgesetzt werden können, sind Körperteile. Das beste Beispiel sind Organe mit komplexen inneren Konfigurationen auf Zellebene. Neben der Möglichkeit, Ersatzorgane ohne Abstoßungsrisiko zu schaffen, könnten diese Strukturen auch unsere natürlichen Fähigkeiten erweitern, beispielsweise durch ein erweitertes Atemvolumen, Widerstandsfähigkeit gegenüber Giftstoffen oder viele andere Funktionen, die weit über die natürlichen Grenzen unseres Körpers hinausgehen. Derzeit werden die 3D-gedruckten organischen Objekte nur für den Test neuer Medikamente außerhalb des Körpers genutzt, bevor sie für einen lebenden Organismus zugelassen werden. Aber schon bald wird es implantierbare Organe in voller Größe geben.

## **Individuelle Medikamente**

Spezielle 3D-Drucker für die Herstellung von Medikamenten können individuelle Tabletten drucken, die jeweils eine Kombination der grundlegenden Stoffe enthalten, die ein Patient im Verlauf seiner Behandlung benötigt. Es gibt bereits vergleichbare Systeme, die die traditionelle Fertigung verwenden, aber ihre Produkte sind in der Regel weiterhin Kombinationen aus vorhandenen Rezepturen, wobei die herkömmlichen Standarddosierungen nur abhängig vom Körpergewicht angepasst werden. Die Kosten, individuelle Behandlungsprogramme zu schaffen, waren bisher sehr hoch – nicht zu sprechen von speziell für einen Patienten angefertigten Tabletten. 3D-gedruckte Pharmasysteme können solche Herausforderungen bewältigen und die Mischung für jede Tablette so einfach herstellen wie eine Tablette mit nur einem einzigen Wirkstoff. Die Mischung kann dem Körpergewicht, der Absorptionsrate, der täglichen Nahrungsmittel- und Wasseraufnahme sowie dem allgemeinen Gesundheitszustand angepasst werden, und sie kann sogar aus verschiedenen neuen Nanomaterialien und den einfacheren Stoffen von heute zusammengesetzt werden.

# Stichwortverzeichnis

#define 266  
#define MOTHERBOARD  
267  
123D Catch 108  
123D Creature 101  
123D Design 101  
3D-Dateien 206  
3D-Druck 23, 37, 327  
Grenzen der Technik 51  
3D-Drucker 167  
kalibrieren 320  
3D-Erfassungssystem 103  
3D-gedruckte Kunst 157  
3D-Modelle 99, 117  
3D-Modell-Viewer 109  
3D-Objekte drucken 327  
3D-Objektmodell 95  
3D-Objekt-Viewer 109  
3DR 171, 189, 192  
3D-Scanner 105  
3DStudioMax 95  
3DTin 308  
3-fach-Extruder 287  
4D-Druck 151

## A

ABS 32, 48, 194, 198  
Abstützung 303  
Achse, vertikale 216  
Achsensystem, bewegliches 228  
Acrylnitril-Butadien-Styrol  
32, 48, 198  
Add-ons 253  
Aderendhülsen 262, 282  
Alternative Materialien 340  
Aluminiumrahmen 223  
Anforderungen 179  
Animation 118  
Antriebsmodule 252  
Antriebssysteme 220  
Architektur 347

Arduino 205, 239, 270  
Arduino IDE 265  
Arduino-Controller 182  
Arduino-Software 264  
Arduino-Tools 264  
Artec 105  
ATX-Netzteil 243, 258  
Auswirkungen 131  
Autodesk 95, 108, 123, 308  
Autodesk Revit 99

## B

Bausatz 213  
Bauwesen 347  
Beleuchtungsdesign 125  
BendLay 151  
Bewegungssysteme 218  
Bioprinter 344, 345  
Bioprinting 89, 154, 167  
BLEND 95  
Blender 95  
Blown Powder 45  
Bowden-Extruder 276  
Bowyer, Adrian 35  
Brook Drumm 188  
Brücken 298

## C

CAD-Software 99, 126  
Carbomorph 148  
CC 183  
Chris Palmer 185  
Cold-End, Temperatur-  
prüfung 292  
COLLADA 110  
Community-Verzeichnis 97  
configuration.h 266, 322  
Copyright-Gesetz 141  
Copyright-Schutz 120  
Creaform 105

Creative Commons Attribution  
Share Alike-Lizenz 182  
Creative Commons License 182  
Cube 48, 167  
Cubify.com 96  
Cura 206  
Cyanoacrylat 85

## D

Darwin 167  
Dateiformate 95  
DEFAULT\_ACCELERATION 269  
DEFAULT\_AXIS\_STEPS\_  
PER\_UNIT 269, 324  
DEFAULT\_Kd 268, 323  
DEFAULT\_Ki 268, 323  
DEFAULT\_Kp 268, 323  
DEFAULT\_MAX\_  
ACCELERATION 269  
DEFAULT\_MAX\_FEEDRATE  
269  
DEFAULT\_RETRACT\_  
ACCELERATION 270  
Delta 38  
Delta-3D-Drucker 192  
Delta-Drucker 172  
Delta-Roboter 171  
Demokratisierung 115  
Descartes 168  
Design 306  
abgeleitetes 116  
Design-Verzeichnis 98  
Digital Millennium Copyright  
Act 139  
Digital Rights Management 142  
Digitales Mikrometer 325  
Digitalisierungsprojekt 116  
Disney 125  
DMCA 139  
DRM 142  
Druckeinstellungen 313

Drucker  
 Bioprinting 167  
 Cube 167  
 Druckerauswahl 179  
 Druckmedium 193  
 Druckplatte 203  
 Nivellierung 322  
 Düse verstopft 293  
 DXF 95

## E

E3D 202  
 Ed Sells 185  
 Eigentum, geistiges 136  
 Einwandige Objekte 331  
 Einzelstück 58  
 Elefu 243  
 Elektronik 205, 213, 239  
 Email-Widerstand 201  
 eMaker Bowden 202  
 eMaker Huxley 187  
 Endanschlagschalter 322  
 Ethische Kontrollen 142  
 Extrudatquellung 311  
 Extruder 77, 200, 273  
 Betrieb und Upgrades 292  
 Montage 279  
 Pasten-Extruder 283  
 Reinigung 293  
 Reparatur 293  
 Sortiment 295  
 Extruderdistanz, Kalibrierung 323  
 Extruderdüse 201  
 Extrudieren 26  
 Extrusionstemperatur 312

## F

Fab@Home 128, 176  
 Fab@Home-Projekt 283  
 Fablabs 37  
 Faden 26, 194  
 Durchmesser überprüfen 311

Reinigung 293  
 Typen 78  
 Fadenfördermechanismus blockiert 294  
 FARO 105  
 FDM 38, 47, 78, 167  
 Fernsehsendungen 119  
 Fertigung  
 additive 17, 23--25, 37  
 Auswirkungen 131  
 direkte digitale 23, 58  
 lokale 135  
 subtraktive 29  
 Fertigungskette 134  
 FFF 167  
 FFF-Drucker 302  
 Filament 26, 194  
 Filamentschraube 274  
 Filme 118  
 Filmproduktionen 347  
 Firmware 205, 239, 263  
 Flachbandkabel 294  
 Flexibilität 66  
 Fließpunkt 196  
 Fördermechanismus 273  
 Form1 176  
 FormOne 40  
 Formpressung 29  
 Forschungsübersicht 145  
 Fotogrammetrie 106  
 Fotopolymere 38  
 Fotopolymer-Harze 88  
 Fotopolymertechnologie 141  
 Fülldicke 213  
 Fused Deposition Modeling 38, 47, 78, 167  
 Fused Filament Fabrication 84  
 Fused Freeform Fabrication 167

## G

G-Code 206, 310  
 Gebäude 62  
 Geblasenes Pulver 45  
 Geistiges Eigentum 136  
 Geomagic FreeForm 109

Geometrie 103  
 Gewebe 91, 345  
 Gewindespindel 219  
 Gewindestange 218  
 GitHub 264, 321  
 Glasktemperatur 196  
 GND 251  
 Gnu General Public License 182  
 Google Sketchup 302, 306  
 Granulate 38, 43, 85  
 Gray -Goo-Szenario 150  
 Größenbeschränkungen 51

## H

Haftung 139  
 Hallsensor 256  
 Haushaltswaren 62  
 HDPE 82  
 Heißes Ende *siehe* Hot-End  
 Heizbett 247, 312  
 Heizblock, Reparatur 294  
 Heizelement 201  
 High Impact Polystyrene 82  
 High-Density Polyethylene 82  
 HIPS 82  
 Holz 151  
 Holzrahmen 224  
 Home-Position 236, 256, 322  
 HOMING\_FEEDRATE 269  
 Hot-End 200, 273  
 Montage 281  
 Reparatur 293  
 Positionierung 322  
 Temperaturprüfung 293  
 Temperaturregelung 323  
 Huxley 187  
 HydraRaptor Blog 185

## I

i3 185  
 iMaterialize 120  
 Implantate 67, 351  
 INVERT\_X\_DIR 269  
 ISS 152

## J

Jean-Marc Giacalone 187  
 Jeff de Boer 165  
 J-Kopf 202, 281  
 Jobs 117  
 Josef Prusa 185

## K

Kabelschäden 294  
 Kalibrierung 320  
 Kapton 204  
 Kartesisch 38  
 Kartesisches Koordinaten-  
 system 168  
 Kartuschenheizer 201  
 Kayser, Markus 33, 353  
 Kisslicer 206  
 Kleidung 69, 157, 346  
 Komplexität 31  
 Konstruktionsplatte 38  
 Kontrolle 144  
 Koordinatensystem,  
 kartesisches 168  
 Körperteile 354  
 Kossel 192  
 Kreativität 159  
 Kugelgewindespindel 219  
 Kühlgebläse 292  
 Kühlkanal 299  
 Kühlung von Objekten 297  
 Kunstgegenstände 116  
 Kunsthandwerk 347  
 Kunststoffaden 26  
 Kunststoffpolymere 26  
 Kunststoffpulver 44, 85  
 Kunststoffteile 213  
 Kunstwerke 157

## L

Laminierung 38, 45  
 LayBrick 151, 194  
 LayWood 83, 194  
 LayWoo-d 3, 151  
 LCD-Bildschirm 253  
 Lebensmittel 86, 90, 344, 345,  
 353

Lehrmaterial 146  
 Lexan 81  
 Licht, strukturiertes 103  
 LiDAR 105  
 Lizenzbedingungen 163  
 Lizenzen 182  
 LOHAN 149  
 Luddite 27  
 Lüfter 292, 297  
 Luftfahrt 348

## M

m303 (Befehl) 323  
 Maisstärke 194  
 Maker Movement 97  
 MakerBot 110, 128  
 MakerBot Replicator 2, 48, 167  
 MakerWare 110  
 Marktreife 339  
 Marlin 192, 239, 264, 322  
 Maschinen bauen 150  
 Maschinenstürmer 27  
 Massenproduktion 339  
 Materialauswahl 151  
 Materialbedarf 341  
 Materialeinschränkungen 53  
 Materialien 32, 179, 193  
 alternative 91  
 extrudierte Alternativen 84  
 stranggepresste 78  
 Medikamente 354  
 Medizin 68, 345  
 Megatronics 243  
 Mehrfarbendruck, 3-fach-  
 Extruder 287  
 Melzi-Board 241  
 Mendel 90, 185  
 MendelMax 96  
 MendelMax V2 189, 190, 223  
 Mesh 110, 308  
 Fehler 308  
 MeshLab 110  
 Meshmixer 308  
 Metallpulver 86  
 Microsoft Fusion 105  
 Microstep-Modus 254  
 Microstepping 253, 325  
 Mikrometer, digitales 325

Mikroschalter 256  
 Milchsäure 194  
 Milchtüten 83  
 Militär 353  
 Militärische Nutzung 71  
 Mineralien 88  
 Minitronics 241  
 Modellierung, parame-  
 trische 306  
 Modellressourcen 301  
 Modern Meadow 90  
 Modulare Komponenten 253  
 Monster 101  
 Morgan 175  
 Motor 251, 253  
 Motoren 214  
 Müll 83

## N

Nachhaltigkeit 32  
 NanoScribe 89  
 Nanotechnologie 151  
 NASA 152  
 NEMA 17, 214  
 netfabb 206, 304  
 netfabb Basic 206, 308  
 netfabb Studio 111  
 Netzteil 251  
 Nickelchrom-Draht 201  
 Nophead 185  
 Nylon 194  
 Nylon-Pulver 302

## O

OBJ 95, 110  
 Objektdesigns 97  
 Octopod 160  
 Open Source 182  
 OpenSCAD 306  
 Optischer Sensor 256  
 Organe 91, 143, 345, 354  
 Osseointegration 351

## P

Paste 198  
 Pasten 283



Pasten-Extruder 283  
 Patente, abgelaufene 140  
 Patentgesetz 141  
 Patentschutz 141  
 PC 81  
 PEEK 201  
 Personalisierung 30, 68  
 Pflanzenzucker 79  
 PHA 196  
 PHF 196  
 PhotoScan 107  
 Pico 281  
 PID 268  
 PLA 32, 48, 79, 194  
 PLY 110  
 Polyactid 79  
 Polyamide 81  
 Polycarbonat 81  
 Polyethylen, hohe Dichte 82  
 Polyhydroxyalkanoate 196  
 Polyhydroxyfettsäuren 196  
 PolyJet 41, 90, 141  
 Polylactide 32, 48  
 Polylactidsäure 194  
 Polymer 79  
 Polymilchsäure 79  
 Polystyrol, hochschlagfestes 82  
 Polyvinylalkohol 81  
 Ponoko 120  
 Poser 302  
 Positionssensoren 246, 256  
 Potentiometer 322  
 Printed Optics 83, 125  
 Printrbot 187  
 Printrbot Jr V2 188, 189  
 PrintToPeer-Projekt 165  
 private Shops 120  
 Produktionsgeschwindig-  
 keiten 51  
 Produktionslinien 132  
 Pronterface 206, 320, 328  
 Extruderkalibrierung 324  
 Proportional-Steuerkreis 268  
 Prothese 69  
 Prothetik 346  
 Prototyp 50, 56  
 Prototyping 36  
 schnelles 37, 56, 115  
 Prusa i3 185, 189, 222

Montage 215  
 Prusa Mendel 185  
 Prusa V2 202  
 Prusa V2-Düse 281  
 PTFE 201  
 Pulverbett 44  
 Pulverbindung 43  
 Punktwolke 103  
 PVA 81  
 als Stützmaterial 303  
 Pwdr 1, 176, 177

## Q

Quarz 88

## R

Rahmen 200  
 RAMBo 240  
 RAMPS 240  
 RAMPS-Elektronik 249  
 Montage 282  
 Raumfahrt 152, 348, 353  
 Recht auf geistiges  
 Eigentum 119, 136  
 Schutz 142  
 ReconstructMe 105  
 Recycling 33, 66  
 Regrind 194  
 Reparatur 59  
 Repetier 110  
 Repetier-Host 206, 207  
 Replicator 2/2X 128  
 ReplicatorG 207  
 RepRap 17, 128, 349  
 RepRap Arduino MEGA Pololu  
 Shield *siehe* RAMPS  
 RepRap-3D-Drucker 167, 179  
 RepRap-Elektronik, Über-  
 blick 239  
 RepRap-System 35  
 Rhinoceros 308  
 Robotik 348  
 Rostock 192  
 RostockMax 189, 192, 224  
 RUMBA 242

## S

Salz 86  
 Sand 88  
 Sanguinololu 241  
 SA-Symbol 183  
 SCARA 175  
 SCENECT 105  
 Schaltkreise 81  
 Schichthöhe 296  
 Schichttemperatur, Kontrolle  
 der 297  
 Schienen 213  
 schmelzen 43  
 Schmelzschichtmodellierung  
 38, 47  
 Schmuck 157  
 Schnellkupplungswagen 297  
 Schraubklemmen 262  
 Schrittmotor 252  
 SeeMeCNC 193  
 Selective Laser Sintering 302  
 selektives Laser-Sintering 68  
 Self-Replicating Rapid, Proto-  
 typing 17, 35, 167  
 Sensoren 253  
 Shapeways 120, 121, 140  
 share alike 183  
 Sintering 349  
 Sintern 43, 67  
 Skalierbarkeit 66  
 SketchUp 95  
 SKP 95  
 SLDPRt 95  
 Slic3r 205, 298, 328  
 Druckeinstellungen 313  
 konfigurieren 310  
 Slicing 308  
 Slicing-Engine 207  
 SLS 68  
 SLS-3D-Drucker 302  
 Smithsonian Institute 116  
 Software 205, 301  
 Design 306  
 Solar Sinter 33, 88, 353  
 SOLID Learning 146  
 SolidWorks 95, 308  
 SpiderBot 49  
 Spiral Vase 331

Sprinter 239  
 Spritze 283  
     Materialien 285  
 Spritzguss 29  
 Standardelektronik 239  
 Startposition 236  
 Stereolithografie 39  
 Steuerelektronik 205  
 Steuersprache 206  
 STL 39, 95, 110, 306  
 STL Viewer 110  
 STL-Codierung 101  
 STP 95  
 Stratasys 47  
 Strombegrenzung 255  
 Stützen 303  
 Stützmaterial 303  
 Salsa 149  
 Superkleber 85

## T

Tantillus 191  
 Teflon 201  
 TEMP\_SENSOR 268  
 TEMP\_SENSOR\_BED 268  
 Temperatursensor 201, 293  
 Tesserakt 151  
 Textilien 69, 346  
 Thermistor 201  
 Thermoplast 78, 193  
     Definition 48

Thermoplast-Extruder 273  
 Thermosonde 292  
 Thingiverse 31, 98, 118, 327  
     Patente 140  
 TinkerCAD 99, 308  
 Tintenstrahldruck 141  
 Tools 126  
 Trade-Related Aspects of  
     Intellectual Property  
     Rights 137  
 Transport 340  
 Trennung, thermische 201  
 TRIPS-Vereinbarung 137

## U

Ultimaker 190  
 Umweltfreundlichkeit 341  
 United States Patent Office 140  
 Universeller Pasten-  
     Extruder 283  
 USPTO 140

## V

Veralterung, geplante 33  
 Verkabelung 294  
 Verschleiß 341  
 Von Neumann 150  
 VoxelJet 44  
 VoxelJet-System 85

## W

Wachsausschmelzguss 48  
 Wallace 187  
 Walt Disney Company 83  
 Wärmesperre 292  
 Weltraum 72  
 Werkzeuge 353  
 Wiederholbarkeit 66  
 WIPO 137  
 World Intellectual Property  
     Organization 137  
 World Trade Organization 137  
 WTO 137

## X

X\_ENDSTOP\_INVERTING 268,  
     322  
 X\_MAX-POS 269  
 XYZ/RGB 105

## Z

Z-Achse 216, 218  
 Z-Achsen-Endanschlag 322  
 ZPrinter 85  
 Zucker 86  
 Zwischenrad 277