

Einleitung _____ 7

1. 3D-Druck, eine kurze Geschichte des Rapid Prototypings _____ 11

Kapitel 1

1.1 Wie alles anfang _____ 11

1.2 Subtraktive und additive Fertigungsverfahren _____ 12

1.3 Vom Rapid Prototyping zum 3D-Druck für jedermann _____ 14

2. 3D-Druck, wie funktioniert das? _____ 19

Kapitel 2

2.1 Die computergesteuerte Heißklebepistole oder der FDM-Druck _____ 19

2.2 Von der Idee zum Modell _____ 22

2.3 FDM-Druck farbig _____ 33

2.4 FDM-Druck mit Kohlefasern verstärkt _____ 35

3. Weitere 3D-Druck-Verfahren _____ 37

Kapitel 3

3.1 Stereolithografie, der Klassiker _____ 37

3.2 Digital Light Processing _____ 41

3.3 LCD-Druck _____ 43

3.4 PolyJet bzw. MultiJet Modeling _____ 44

3.5 Pulverdruckverfahren _____ 47

3.6 SLS- und Metalldruck _____ 51

3.7 Laminated Object Modeling und Selective Deposition Lamination _____ 56

4. Welcher Drucker für welchen Zweck? _____ 59

Kapitel 4

4.1 Welche Art von Produkten soll gedruckt werden? _____ 59

4.2 Welche Materialanforderungen werden gestellt? _____ 63

4.3 Stärken und Schwächen der Drucktechnologien _____ 64

4.4 Kosten der Drucktechnologien _____ 66

**Kapitel
5**

5. Moderne Produktentwicklung mit 3D-Druck	67
5.1 Änderungen bei der Produktentwicklung	67
5.2 Time to Market mit 3D-Druck reduzieren	69
5.3 Stückkosten und Stückzahlen	70
5.4 Grenzenlos neue Möglichkeiten	71

**Kapitel
6**

6. 3D-Drucker: Hersteller und Geräte	75
6.1 FDM-Drucker	75
6.2 FDM-Drucker für Profis	90
6.3 Stereolithografie-Drucker	92
6.4 Digital-Light-Processing-Drucker und LCD-Drucker	93
6.5 Pulverdrucker	95
6.6 Selektives Lasersintern	96

**Kapitel
7**

7. Software für die 3D-Modellierung	97
7.1 Arbeitsweisen in CAD-Programmen	97
7.2 Kostenlose Programme	99
7.3 Die preisgünstigen CAD-Programme	105
7.4 CAD-Profi-Programme	110

**Kapitel
8**

8. Software für die Datenaufbereitung und Druckersteuerung	115
8.1 Viewer-Programme	115
8.2 Konvertierungs- oder Migrationsprogramme	118
8.3 Programme zur Druckersteuerung	122
8.4 Reparatur und Bearbeitung von STL-Dateien	127

**Kapitel
9**

9. 3D-Modelle aus dem Internet	129
9.1 Onlineportale für Bastler und Technikfans	129
9.2 Onlineportale für 3D-Konstruktionsdaten	143
9.3 Onlineportale für Bildung und Forschung	147

10. Materialien für den 3D-Druck	155
10.1 Filament, das Material für den FDM-Druck	155
10.2 Standard-Filamente	157
10.3 Filamente für Stützmaterial	167
10.4 Filamente mit Beimischungen	169
10.5 Spezial-Filamente	171
10.6 Resin, das Material für SLA- und DLP-Drucker	173
10.7 Materialien für PolyJet- bzw. MJM-Drucker	174
11. Selbst modellieren mit CAD	177
11.1 Der Einstieg mit TinkerCAD	177
11.2 Mehr CAD mit FreeCAD	199
11.3 Modellieren mit Fusion 360	221
12. Datenaufbereitung für den 3D-Druck	279
12.1 Drucken mit Cura	280
12.2 Drucken mit Simplify3D	289
13. 3D-Druck in der Praxis: Tipps und Tricks	297
13.1 Optimierung der Druckqualität bei FDM-Druckern	297
13.2 Parameter in der Slicer-Software optimieren	304
13.3 Tipps für Fortgeschrittene	316
13.4 Troubleshooting	328
13.5 Modellierungstipps für den 3D-Druck	334
14. 3D-Scannen	347
14.1 3D-Modelle aus einer Fotoserie berechnen	348
14.2 Scannen mit Microsoft Kinect oder Asus Xtion	352
14.3 Zwei 3D-Drucker, die auch scannen können	357
14.4 Scannen mit strukturiertem Licht	358

**Kapitel
10**

**Kapitel
11**

**Kapitel
12**

**Kapitel
13**

**Kapitel
14**

14.5	Die High-End-Lösungen	365
14.6	Körperscanner	369

Kapitel 15

15.	3D-Druck außer Haus	371
15.1	Der 3D-Printshop um die Ecke	371
15.2	FabLabs	371
15.3	Stadtbibliotheken	372
15.4	Medienzentren	373
15.5	Der 3D-Printshop im Internet	373
15.6	Das 3D-Selfie	380

Kapitel 16

16.	3D-Druck: was heute schon geht und was kommen könnte	381
16.1	Architektur und Bauwesen	381
16.2	Automobil, Verkehr, Fahrzeugbau	385
16.3	Denkmalpflege und Archäologie	388
16.4	Dentaltechnik	389
16.5	Einrichtungsobjekte und Möbel	391
16.6	Kriminalistik	393
16.7	Lebensmittel	394
16.8	Luft- und Raumfahrttechnik	396
16.9	Medizin, Reha-Produkte und Brillen	398
16.10	Mode und Bekleidung	402
16.11	Produktion	403
16.12	Schmuck	406
16.13	Sport und Freizeit	406

Index	410
--------------	------------

3. Weitere 3D-Druck-Verfahren

Kapitel 3

Das FDM-Verfahren ist nicht alles, auch wenn für den Hobby- und semi-professionellen Anwender im Moment aus finanziellen Gründen wenig anderes infrage kommt. Aber die Entwicklung schreitet rasant voran. Was heute noch unerschwinglich ist, kann in ein paar Jahren schon in bezahlbare Regionen kommen. Deshalb wollen wir uns in diesem Kapitel die verbreiteten 3D-Druck-Verfahren ansehen. Das FDM-Verfahren haben Sie im letzten Kapitel schon kennengelernt. Darauf soll hier nicht noch mal eingegangen werden. Die im Folgenden beschriebenen Verfahren finden heute bei 3D-Druckern Verwendung.

3.1 Stereolithografie, der Klassiker

Wie Sie schon in Kapitel 1 erfahren haben, wurde das **Stereolithografie-Verfahren** (SLA) von Chuck Hull entwickelt – es ist der Urahn aller 3D-Druck-Verfahren. Das Prinzip ist einfach oder besser gesagt einfach genial. In einem Becken befindet sich ein flüssiger Kunststoff, ein Epoxidharz. Es härtet unter Einwirkung von Licht aus. Der Fachbegriff dafür lautet Photopolymer. Damit das schneller geht, wird ein Laser verwendet, der den Kunststoff schichtweise härtet.

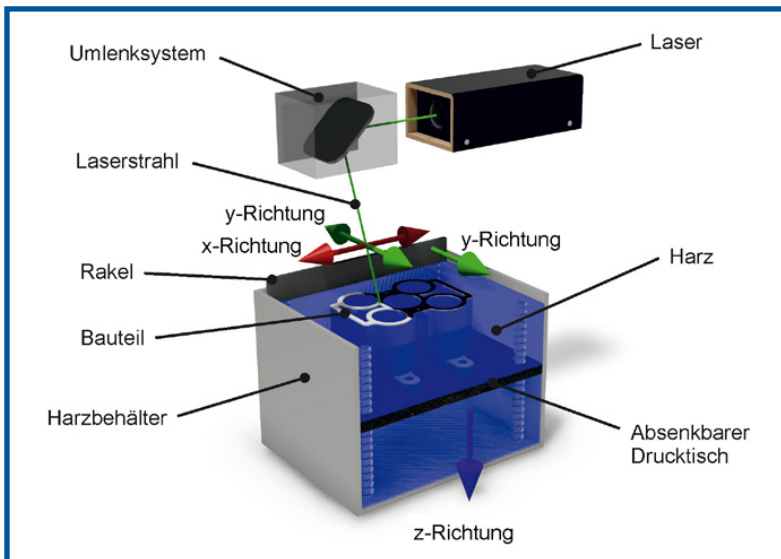


Abbildung 3.1:
Das Prinzip der
Stereolithografie.
(Grafik: AnS)

Wie der Extruder beim Schmelzschichtverfahren wird der Laserstrahl über das Druckbett geführt (siehe Abbildung 3.1). Das erfolgt über ein Umlenksystem mit einem beweglichen Spiegel. So härtet der Laserstrahl

eine Schicht aus; man spricht auch hier wieder von einem Layer. Danach wird das Druckbett um die Dicke eines Layers abgesenkt. Das Harz fließt nun über die bereits ausgehärtete Schicht, sodass wieder eine ein Layer dicke Harzschicht entsteht, und der Aushärtungsprozess des Layers beginnt erneut. Auf diese Weise entsteht das Modell Schicht um Schicht. Nach dem kompletten Vorgang wird das Modell aus dem Bad genommen und oft noch in einem separaten Vorgang nachgehärtet.

Wie beim FDM-Verfahren sind auch hier Stützstrukturen erforderlich. Wenn Inseln gedruckt werden, die keine Auflagefläche haben, würden diese im flüssigen Harz absinken. Diese Stützstrukturen können nur im Objektmaterial erstellt werden. Das Material muss nachher mechanisch entfernt werden. Mehrfarbige Drucke sind bei diesem Verfahren nicht möglich.

Abbildung 3.2:
Großformatiger
SLA-Drucker ProX
800 von 3D Systems.
(Foto: 3D Systems)



Die Vorteile liegen auf der Hand: Da wenig Mechanik bewegt werden muss, erreicht man eine deutlich höhere Druckqualität als beim FDM-Verfahren. Geräte, die nach dem SLA-Verfahren arbeiten, fanden Sie in der Vergangenheit meist nur in der oberen Preisklasse (siehe Abbildung 3.2).

Seit einiger Zeit werden preisgünstigere Desktop-Geräte im Bereich von 3.500 Euro aufwärts angeboten. Bei diesen ist der Druckvorgang auf den Kopf gestellt. Der Drucktisch ist oben und wird bis

auf die Oberfläche des Harzes abgesenkt. Die Belichtung mittels Laser erfolgt von unten. Ist eine Schicht, also ein Layer, belichtet und damit gehärtet, wird sie aus dem Harz gezogen und der nächste Layer belichtet. So wird das Objekt Schicht um Schicht bzw. Layer um Layer aus dem Harz gezogen. Mit dieser Methode lassen sich kompaktere Geräte bauen (siehe Abbildung 3.3).

Trotz des relativ kleinen Bauraums eignen sie sich zur Prototyp-Erstellung oder zur Herstellung von Gussmodellen für den Schmuckdesigner sowie das Dentallabor (siehe Abbildung 3.4). Glatte Oberflächen und eine hohe Detailwiedergabe sind das Ergebnis dieses Verfahrens (siehe Abbildung 3.4, das Modell *Form 3* von Formlabs). Allerdings sind die mechanischen und thermischen Belastbarkeiten geringer als bei anderen Kunststoffen.

Aber die Entwicklung der Materialien macht rasche Fortschritte, sodass immer mehr Anwendungsgebiete vor allem für die preiswerten Geräte erschlossen werden (siehe Kapitel 10). Nachteilig sind noch die relativ hohen Materialkosten, die jedoch bei den minimalen Baumassen bei Schmuck- und Dentalanwendungen kaum ins Gewicht fallen.

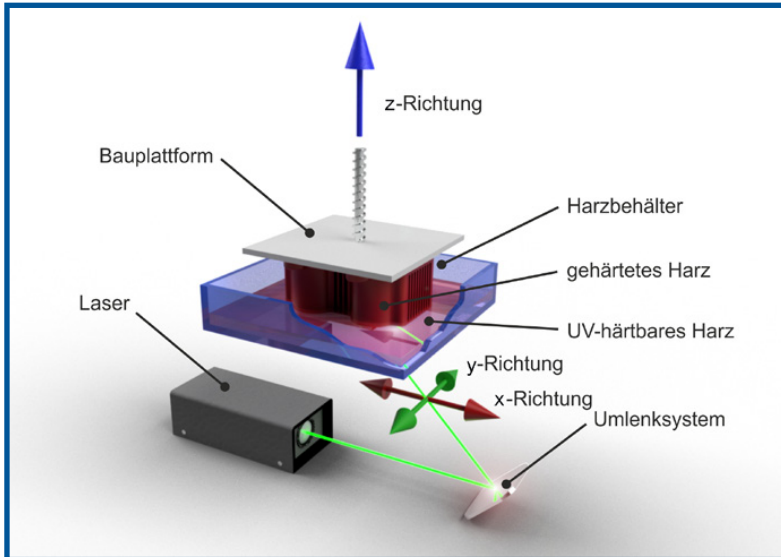


Abbildung 3.3:
Aufbau kompakter
Stereolithografie-
Geräte.
(Foto: AnS)



Abbildung 3.4:
SLA-Drucker
Form 3+ von
Formlabs zum
Druck von Kunst-
stoffteilen.
(Foto: Formlabs)

Schmuckdesigner haben damit ein ideales Werkzeug beim Entwurf und bei der Fertigung von individuellem Schmuck. Selbstverständlich kann nicht mit Edelmetallen gedruckt werden. Es lässt sich aber ein Positivmodell mit Wachs drucken (siehe Abbildung 3.5). Daraus kann eine Gipsform erstellt und das Wachs ausgeschmolzen werden, sodass man damit die Gussform für das endgültige Produkt hat.

Abbildung 3.5:
Entwurf von
Schmuck mit
SLA-Druckern.
(Foto: Formlabs)



Wie oben schon beschrieben, muss auch beim SLA-Druck Stützmaterial verwendet werden. Da sehr filigrane Strukturen gedruckt werden können, kann das manuelle Entfernen des Stützmaterials zu Beschädigungen des gedruckten Objekts führen. Spezielle Stützstrukturen mit sehr kleinen Berührungspunkten erleichtern das Entfernen. Sie hinterlassen nur geringfügige Spuren.

Außerdem müssen die Teile in einem Lösungsmittel gewaschen werden, um überschüssiges Kunstharz zu entfernen. Es gibt spezielle Waschstationen, die diesen Vorgang automatisiert übernehmen. Damit die gedruckten Teile ihre endgültige Materialeigenschaft bekommen, ist bei bestimmten Materialien ein Härten erforderlich. Dies erfolgt in einer Kammer mit speziellem Licht und bei Temperaturen von 60 °C bis 80 °C, je nach Material. Dafür gibt es Härtestationen. Abbildung 3.6 zeigt das System von Formlabs mit der Waschstation *Form Wash* und der Härtestation *Form Cure*.



Abbildung 3.6:
Wasch- und Härte-
station für Formlabs
SLA-Drucker.
(Foto: Formlabs)

3.2 Digital Light Processing

Nach einem ähnlichen Prinzip wie die Stereolithografie funktioniert auch das **Digital-Light-Processing-Verfahren** (kurz DLP). Doch statt mit einem Laserstrahl wird die Oberfläche des flüssigen Kunststoffes mit einem DLP-Projektor belichtet (siehe Abbildung 3.7), um jeweils einen Layer auszuhärten. Wenn der Layer fertig ist, wird das Druckbett angehoben.

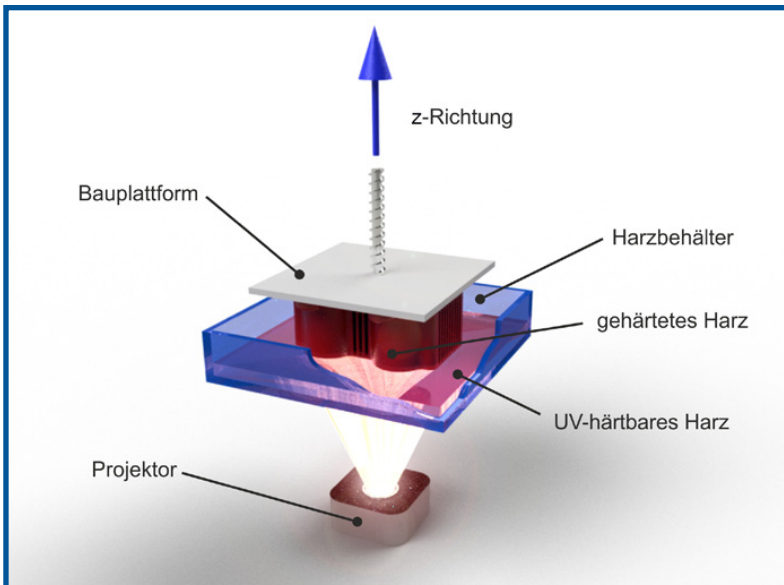


Abbildung 3.7:
Aufbau von
DLP-Geräten.
(Foto: AnS)

Bei diesem Druckverfahren erfolgt die Aushärtung eines ganzen Layers in einem Durchgang. Somit ist es theoretisch schneller als das SLA-Verfahren, da dabei der Laserstrahl den Layer komplett zeilenweise abfahren muss. Wie bei den kompakten Geräten des SLA-Drucks wird er von unten belichtet und das fertige Modell aus dem flüssigen Kunststoff herausgezogen. Layerstärken im Bereich von 50 μm und besser sind mit DLP-Druckern möglich. Die verwendbaren Druckmaterialien entsprechen denjenigen von SLA-Druckern (siehe Kapitel 10).

Nachteilig ist, dass die Auflösung des Modells immer der des Projektors entspricht, und die haben meist nur Full HD, was einer Auflösung von 1.920 x 1.080 Pixeln entspricht. Damit ergeben sich Grenzen für den Bauraum, die meist unter 100 x 100 x 150 mm liegen. Bei größeren Objekten in x- und y-Richtung wären höhere Auflösungen des Projektors erforderlich. Man könnte zunächst meinen, dass die Druckgeschwindigkeit höher sei als bei SLA-Geräten, da ja immer eine komplette Schicht belichtet wird. Das relativiert sich aber wieder, weil das Licht nicht so energiestark wie der Laser ist. Somit haben wir ähnliche Druckgeschwindigkeiten wie beim SLA-Verfahren. Außerdem ändert sich die Geschwindigkeit wie beim FDM-Druck je nach der gewählten Auflösung und dem verwendeten Material. Das Entfernen der Stützstrukturen sowie das Waschen und Nachhärten erfolgt wie beim SLA-Druck.

Abbildung 3.8:
DLP-Drucker Hunter
von Flashforge.
(Foto: Flashforge)



Ein Gerät in DLP-Technik von Flashforge ist der *Hunter* (siehe Abbildung 3.8). Bei einem Preis um die 4.000 Euro verfügt er über einen Bauraum von 120 x 67,5 x 150 mm bei einer Layerstärke, die von 250 bis 50 μm einstellbar ist.

Der *Hunter* ist mit einer eigens dafür entwickelten Lichteinheit (siehe Abbildung 3.9), die nach dem Prinzip eines DLP-Projektors arbeitet, ausgestattet. Die Auflösung beträgt 1080p, also Full-HD-Auflösung. Die Lebensdauer beträgt über 50.000 Stunden. Eine aufwendige Regelung sorgt für konstante Lichtintensität über den ganzen Belichtungsbereich und damit für gleichbleibende Druckqualität und feine Details im Druck.



Abbildung 3.9:
Lichteinheit des
Flashforge Hunter.
(Foto: Flashforge)

3.3 LCD-Druck

Nun gibt es vermehrt Drucker ab 200 Euro aufwärts, vor allem aus Fernost, die mit flüssigem Kunststoff drucken. Dabei handelt es sich um LCD-Drucker, obwohl die verschiedenen Hersteller eigene Benennungen geprägt haben. Die Bezeichnung LCD ist auch vom heimischen Fernseher bekannt. Sie steht für **L**iquid **C**rystal **D**isplay und bezieht sich auf die für den Druck verwendete Lichtquelle. Es wird ein LCD-Display ähnlich wie bei einem Tablet zur Belichtung verwendet, aber mit UV-Licht. Hierbei ist die Lichtenergie noch mal geringer als bei den oben beschriebenen Verfahren. Dies verlängert zwar die Belichtungszeit, hat aber einen besonders einfachen Geräteaufbau zur Folge, was sich dann auch im Preis bemerkbar macht.

Abbildung 3.10:
LCD-Drucker
Anycubic Photon
Mono.
(Foto: Anycubic)



Abbildung 3.10 zeigt als Beispiel das Modell *Photon Mono* von Anycubic, das an der untersten Preisgrenze von ca. 200 Euro liegt. Die maximale Objektgröße ist 130 x 80 x 165 mm, die maximale Druckgeschwindigkeit beträgt 50 mm/h und belichtet wird mit einem 2K-Display, woraus eine x/y-Auflösung von 0,05 mm resultiert.

Sowohl bei den DLP-Druckern als auch bei LCD-Druckern ist Waschen und Härten erforderlich. Das Waschen kann auch manuell erfolgen, wenn man bei diesem

Preis nicht auch noch in eine Waschstation investieren will. Von Anycubic gibt es eine kombinierte Wasch- und Härtestation zu einem Preis, der etwas höher als die Hälfte des Druckerpreises liegt.

Damit ist das Ende der Geräte erreicht, die für den Hobbyanwender erschwinglich sind. Es sollen aber auch die professionellen Technologien beschrieben werden, um dem Leser einen Überblick über den Stand der Technik zu geben. Denn es ist durchaus möglich, dass diese wie auch die Stereolithografie und deren Ableger in Zukunft auch in einen bezahlbaren Bereich kommen.

3.4 PolyJet bzw. MultiJet Modeling

Beim **PolyJet-Verfahren**, auch **MultiJet Modeling** genannt (kurz MJM), wird ein flüssiger Kunststoff verwendet, also wieder ein Photopolymer, ähnlich wie bei der Stereolithografie. Das »Jet« im Namen PolyJet verriet schon, dass es sich um ein Tintenstrahlverfahren handelt. Die ersten Tintenstrahldrucker von Hewlett-Packard hießen schließlich ja auch DeskJet, die Plotter DesignJet und das Verfahren InkJet. Doch statt Tintentropfen auf Papier zu sprühen, tragen PolyJet-basierte 3D-Drucker Schichten aus vernetzbarem, flüssigem Photopolymer in Form kleinster Tröpfchen auf eine Bauplatzform auf und härten diese sofort mit UV-Licht aus. Die Lichtquelle befindet sich am Druckkopf. Als Stützstrukturen trägt der 3D-Drucker ein entfernbares gelartiges Material auf. Dieses kann mit der Hand oder mit Wasser entfernt werden. Die Modelle und Bauteile können direkt nach der Entnahme aus dem 3D-Drucker bearbeitet und

verwendet werden, ohne dass sie nachhärten müssen. Abbildung 3.11 zeigt das Prinzip dieses Verfahrens und Abbildung 3.12 eine High-End-Anlage von Stratasys.

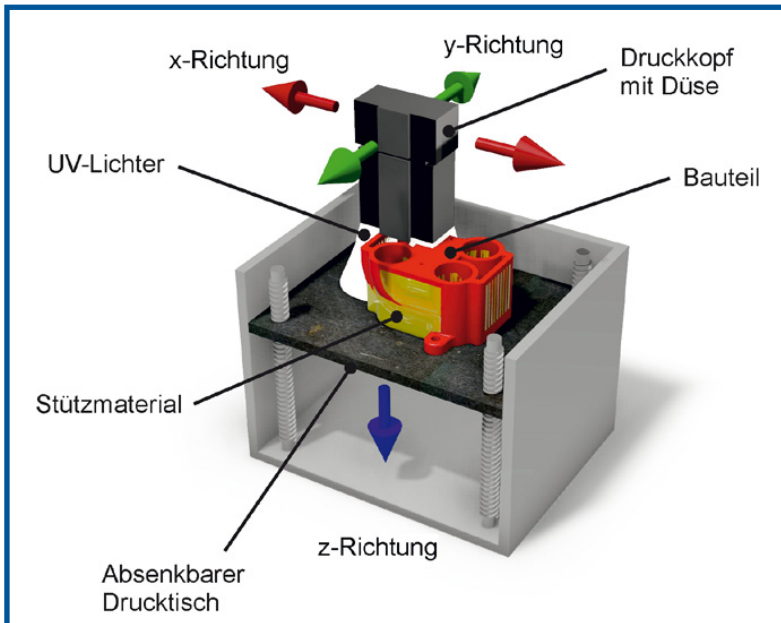


Abbildung 3.11:
Prinzip des PolyJet-
Verfahrens.
(Grafik: AnS)



Abbildung 3.12:
J850 von Stratasys:
Multi-Color/Multi-
Material-Printer.
(Foto: Stratasys)

Das PolyJet-Verfahren hat zahlreiche Vorteile bei der Erstellung von Prototypen und auch von Serienbauteilen: erstaunliche Detailtreue, glatte Oberfläche und Präzision. Benötigen Sie Farben und verschiedene Materialeigenschaften? Moderne Systeme tragen mit mehreren Druckköpfen verschiedene Materialien und unterschiedliche Farben gleichzeitig auf.

Stratasys hat vor einiger Zeit den Multi-Color/Multi-Material-3D-Drucker J850 (siehe Abbildung 3.12) auf den Markt gebracht. Er kann mit sechs unterschiedlichen Grundmaterialien und mit über 360.000 Farben drucken. Damit sind Kombinationen von starren und gummiartigen Materialien möglich sowie die Verwendung von gummiartigen Materialien für flexible Prototypen (siehe Abbildungen 3.13 und 3.14) oder die Herstellung von Fertigungswerkzeugen und Montagevorrichtungen, die feste Materialien mit rutschfesten Oberflächen verbinden.

Abbildung 3.13:
Hochwertig und in
Farbe im PolyJet-
Verfahren gedruckte
Prototypen.

(Foto: Stratasys)



Abbildung 3.14:
Prototyp mit
flexiblen und
starken Materialien.

(Foto: Stratasys)



Für den Hobby-User sind solche Geräte allerdings weit außerhalb des Etats, außer er spielt mit dem Gedanken, die Eigentumswohnung oder das Eigenheim zu veräußern. Reale Prototypen und Muster mit den gewünschten Materialeigenschaften sind für viele Branchen allerdings