

**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**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>5. Moderne Produktentwicklung mit 3D-Druck</b> | <b>67</b> |
| 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**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>6. 3D-Drucker: Hersteller und Geräte</b>          | <b>75</b> |
| 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**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>7. Software für die 3D-Modellierung</b> | <b>97</b> |
| 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**

|   |            |
|---|------------|
| <b>8. Software für die Datenaufbereitung und Druckersteuerung</b> | <b>115</b> |
| 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**

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

|   |            |
|---|------------|
| <b>10. Materialien für den 3D-Druck</b>             | <b>155</b> |
| 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        |
| <b>11. Selbst modellieren mit CAD</b>               | <b>177</b> |
| 11.1 Der Einstieg mit TinkerCAD                     | 177        |
| 11.2 Mehr CAD mit FreeCAD                           | 199        |
| 11.3 Modellieren mit Fusion 360                     | 221        |
| <b>12. Datenaufbereitung für den 3D-Druck</b>       | <b>279</b> |
| 12.1 Drucken mit Cura                               | 280        |
| 12.2 Drucken mit Simplify3D                         | 289        |
| <b>13. 3D-Druck in der Praxis: Tipps und Tricks</b> | <b>297</b> |
| 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        |
| <b>14. 3D-Scannen</b>                               | <b>347</b> |
| 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

|            |                              |            |
|------------|------------------------------|------------|
| <b>15.</b> | <b>3D-Druck außer Haus</b>   | <b>371</b> |
| 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

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| <b>16.</b> | <b>3D-Druck: was heute schon geht und was kommen könnte</b> | <b>381</b> |
| 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        |

|              |            |
|--------------|------------|
| <b>Index</b> | <b>410</b> |
|--------------|------------|

## 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.

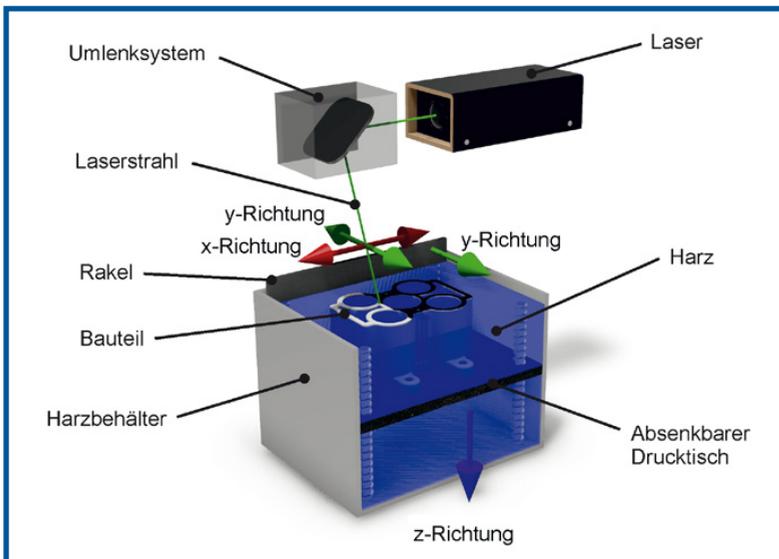


Abbildung 3.1:  
Das Prinzip der  
Stereolithografie.  
(Grafik: AnS)

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.

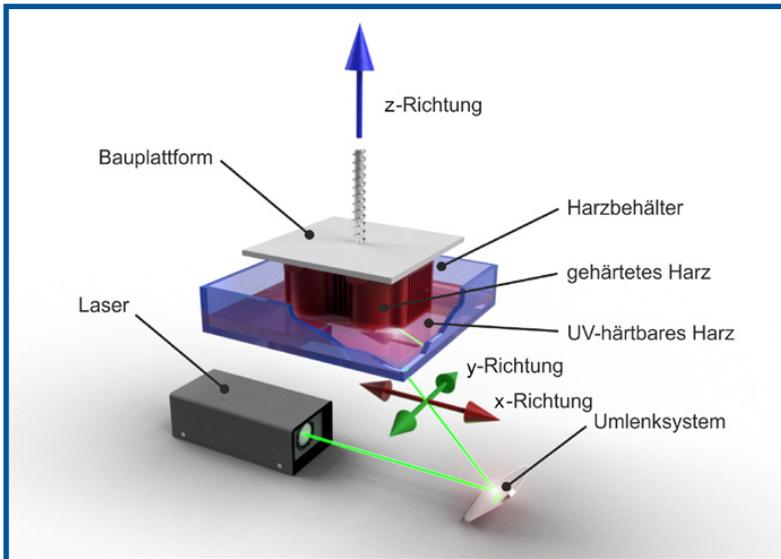


Abbildung 3.3:  
Aufbau kompakter  
Stereolithografie-  
Geräte.  
(Foto: AnS)



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.

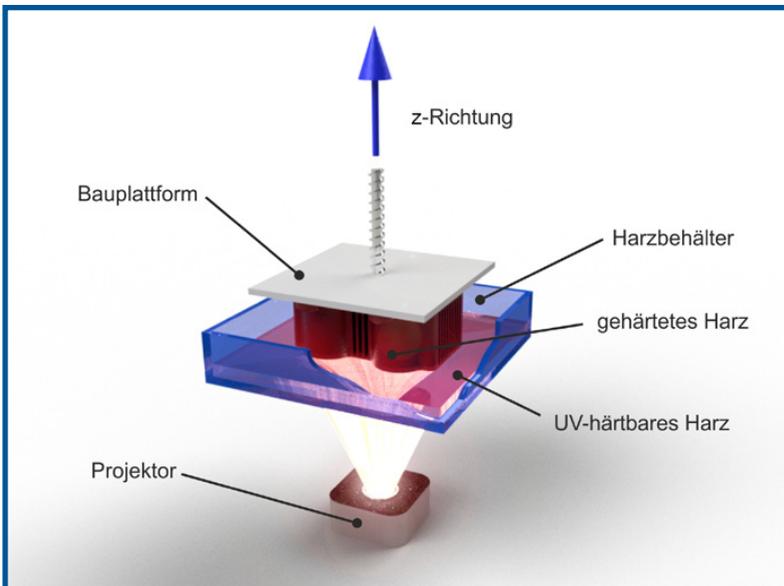


Abbildung 3.7:  
Aufbau von  
DLP-Geräten.  
(Foto: AnS)

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  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$  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.

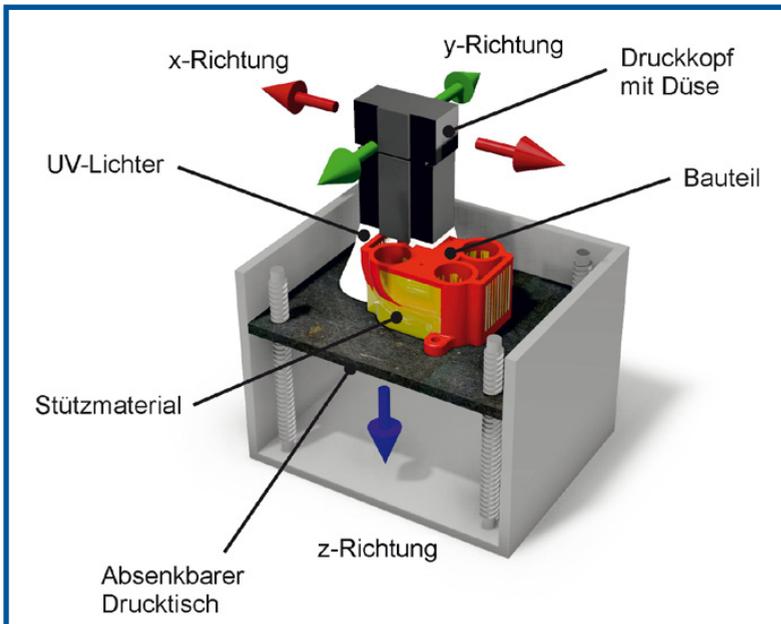


Abbildung 3.11:  
Prinzip des PolyJet-  
Verfahrens.  
(Grafik: AnS)



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