



Alles in 3D-Druck

Additive Produktionstechnik erobert die Welt

Ersatzteile auf der ISS werden heute ebenso selbstverständlich gedruckt wie Flugzeugteile für Airbus-Passagierjets, Prothesen, ganze Häuser oder Hobbyobjekte und Ersatzteile daheim. Wir unternehmen einen Streifzug durch die wichtigsten aktuellen 3D-Drucktechniken und die vielfältigen, teils sogar exotischen Fertigungsverfahren und Anwendungen.

Als besonderen Service haben wir am Ende eine Übersicht zu den 3D-Druckverfahren und -materialien für Sie zusammengestellt.



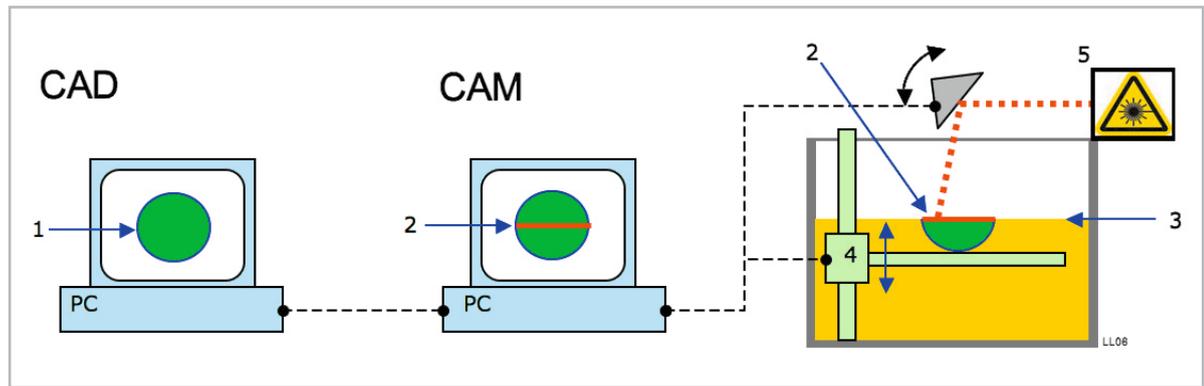


Bild 1: Das Grundprinzip des Stereolithografiedrucks: Ein gesteuerter Laserstrahl belichtet eine dünne Schicht eines fotoresistiven Materials.

Grafik: Laurensvanlieshout, Dutch Wikipedia

Industrierevolution per Laser und Polymer

Das von Charles W. (Chuck) Hull 1984 zum Patent eingereichte additive Fertigungsverfahren „Stereolithografie“ (SLA) ist eine geniale Erfindung. Dabei wird ein für bestimmte Wellenlängen lichtempfindlicher flüssiger Kunststoff von einem durch eine CAM-Datei (CAM = Computer-Aided Manufacturing) gesteuerten Laser in sehr dünnen Schichten, Schicht für Schicht, genau dort ausgehärtet, wo er später als Bauteil in fester Form erscheinen soll. Das ausgehärtete Werkstück wird Schicht für Schicht abgesenkt, sodass es immer mit einer neuen, definierten Schicht flüssigen Kunststoffs bedeckt ist, die wiederum über die Fläche des Werkstücks durch den Laser ausgehärtet wird. Bild 1 zeigt diesen Vorgang schematisch. Heute werden statt Lasern sogar schon DLP-Projektoren bzw. Beamer eingesetzt und so wird das ganze Werkstück in einem Zug, ohne Schichtenaufbau, erzeugt [1].

Chuck Hull schuf auch das STL-Format (STL = Stereolithografie), in das 3D-CAD-Daten (Computer-Aided Design) zunächst konvertiert werden. Nach der Erzeugung eines maschinenlesbaren Codes aus dieser STL-Datei („Slicen“) steuert dieser die Maschine. Heute ist Chuck Hull Miteigentümer einer der fortschrittlichsten und innovativsten 3D-„Fabriken“ der Welt, 3D Systems.

Das Prinzip der additiven Fertigung nahm in den Folgejahren rasant an Fahrt auf. So folgte etwa bald das heute jedem Besitzer eines Hobby-3D-Druckers geläufige FDM-Verfahren (s. u. und in der Übersicht), bei dem ein geschmolzener Kunststoff Lage für Lage in definierten Wegen aufgelegt wird und mit der vorherigen Lage verschmilzt.

Einen wesentlichen Teil zur schnellen Verbreitung dieses Verfahrens, das 1989 erfunden wurde und für das heute 3D-Drucker jeder Art und Größe, vom Kleinstbausatz bis zum Fabrikhallen-großen Fertigungsdrucker für Architekturbauteile, zur Verfügung stehen, trug die Einführung des „Rapid Prototyping“ bei. Der englische Hochschullehrer Dr. Adrian Bowyer vergegenständlichte 2005 seine Vision vom massentauglichen RepRap-Drucker [2]. 2008 baute er den „Darwin“, später den „Mendel“ und den „Huxley“.

In ihrer Open-Source-Abwandlung leben diese Konstruktionsprinzipien, auch dank des Patentablaufs für das FDM-Verfahren, bis heute in einem wachsenden Massenmarkt fort.

So erlebt der private Nutzer das FDM-Verfahren als einfach handhabbares, erschwingliches und für jeden erlernbares additives Druckverfahren. SLA dringt erst seit kurzer Zeit in den privaten Bereich vor. Derartige Maschinen waren von Anbeginn hauptsächlich für die gewerbliche Fertigung konzipiert und – inklusive der verarbeiteten Materialien – extrem teuer. Erst seit wenigen Jahren gibt es auch für den Privat- bzw. FabLab-Bereich erschwingliche SLA-Drucker [3].

Additiv statt subtraktiv

Alle 3D-Druckverfahren sind additive Fertigungsverfahren, das heißt, das zu fertigende Teil entsteht Stück für Stück aus dem Rohmaterial, ohne wesentliche Abfälle. Im Gegensatz dazu stehen die subtraktiven Verfahren, bei denen aus einem Materialrohling solange Material ab-

getragen wird, bis das Objekt fertig bearbeitet ist. Solche Verfahren sind z. B. Fräsen, Bohren, Hobeln, Drehen. Additive Verfahren haben auch den Vorteil, dass komplexe Objekte in einem Arbeitsgang und als ein Stück gefertigt werden können, die man bei subtraktiven Verfahren in mindestens mehreren verschiedenen Arbeitsgängen und meist nur aus mehreren Teilen herstellen kann.

Betrachten wir also die bekanntesten und praktisch eingesetzten additiven Fertigungsverfahren.

FFF/FDM – das Schmelzsichten

Das Verfahren, das wir als Hobby-Anwender überwiegend einsetzen, basiert auf dem schichtweisen Auftragen von geschmolzenen Grundmaterialien, meist Kunststoff (z. B. PLA, PE, PP, ABS, PETG, Nylon) oder (eher im industriellen Bereich eingesetzt) Metall, in der vorgegebenen Form. FFF bedeutet „Fused Filament Fabrication“ (fused: „geschmolzen“). „FDM“ (Fused Deposition Modelling) meint das Gleiche, es ist die vom Groß-3D-Drucker-Hersteller Stratasys eingetragene Markenbezeichnung für das Verfahren. Werden metallhaltige Filamente (Kunststoff-Filamente mit Metallpulverfüllung) verarbeitet, erfolgt zunächst der normale Aufbau im Schmelzsichtverfahren, es entsteht der sogenannte Grünling. Anschließend wird das Metall zur Härtung gesintert (bis unterhalb des Schmelzpunktes erhitzt). Bild 2 zeigt ein so hergestelltes Getrieberad. Als Metallpulver sind hier Stahl, Kupfer, Wolfram, Titan und Edelmetalle verarbeitbar, aber man kann das Verfahren auch mit Keramikmaterialien anwenden.

Die Technik der Drucker ist vergleichsweise einfach. Je nach Konstruktionsprinzip wird zugeführtes Filament zu einem oder mehreren beweglichen



Bild 2: Ein im Sinterverfahren aus metallpulverhaltigem Filament hergestelltes Getrieberad. Foto: Fraunhofer IFAM Dresden



Druckköpfen geführt. Im Druckkopf wird das Filament erhitzt, bis es schmilzt und über eine Düse auf die Druckplattform befördert werden kann, wo es erkaltet und formstabil bleibt. Es gibt verschiedene Konstruktionen, bei denen entweder der Druckkopf feststeht oder allenfalls in der Z-Achse bewegt wird

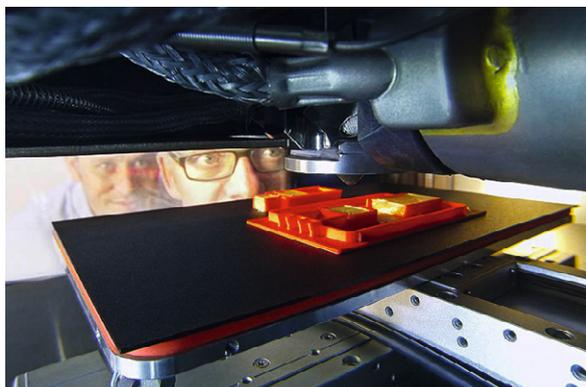
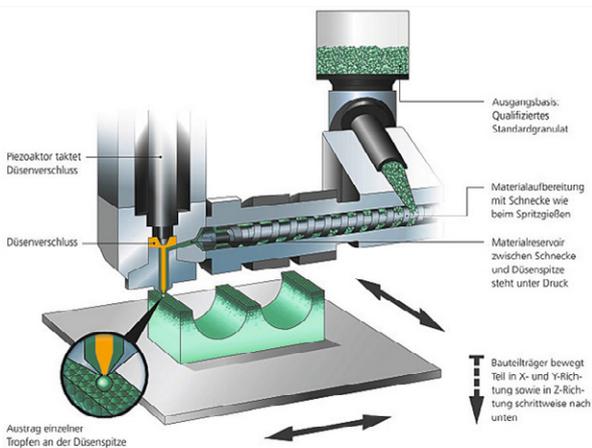


Bild 3: Das Kunststoff-Freiform-Verfahren von Arburg verarbeitet das Grundmaterial direkt, ohne Vorkonfektionierung und Zusätze. Foto: Arburg GmbH

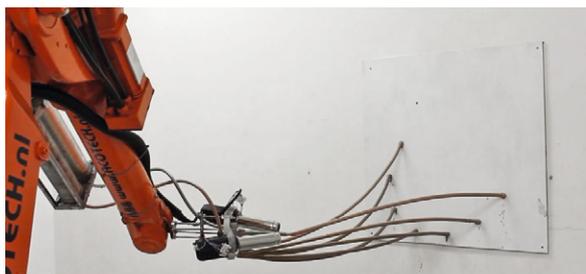


Bild 4: Mit dem AOM-Freiform-Verfahren kann man extrem komplexe Konstruktionen erstellen. Foto: mataerial.com

und sich sonst nur die Druckplattform bewegt, die zur besseren Haftung des Druckobjekts meist beheizt ist. Oder der Druckkopf wird in mehreren Achsen bewegt, die Druckplattform bleibt fest stehen (z. B. Delta-Drucker). Zwischen diesen beiden Konstruktionen gibt es zahlreiche Modifikationen.

Direktdruck aus Granulat

Das FFF-Verfahren funktioniert jedoch nicht nur mit Standardfilamenten in der bekannten Strangform, sondern auch direkt mit einem Granulat als Ausgangsstoff, wie es die deutsche Firma Arburg [4] mit ihrem Kunststoff-Freiform-Verfahren (AKF) beweist (Bild 3). Das Granulat wird aus einem Vorratsbehälter zugeführt, ähnlich wie bei Spritzgießen mit einer Schnecke gefördert und dabei bis zum Schmelzen erwärmt. Schließlich gelangt es in einen Düsenkanal, aus dem das Material in Tröpfchenform, getaktet durch einen Düsenverschluss, über eine Düse austritt und Schicht für Schicht aufgetragen wird. Hier werden also, entgegen den sonstigen Schichtungsverfahren, keine Materialstränge aufgetragen, sondern einzelne Tröpfchen, die fest miteinander verschmelzen. Die großen Vorteile liegen darin, dass die Materialkosten geringer sind als bei vorkonfektionierten Materialien und man keine Kompromisse bei der Materialwahl in Bezug auf die Verarbeitungsbedingungen einer Vorkonfektionierung eingehen muss. Original bleibt also Original. Ganz ähnlich arbeiten übrigens zahlreiche Konstruktionen zur Herstellung von Filament aus Kunststoffgranulat, nur dass hier ein Strang geformt wird, der nach dem Austritt aus dem Düsenkanal definiert gekühlt und gefördert wird.

Wider die Schwerkraft – Anti-Gravity Object Modelling (AOM)

Ein besonders interessantes FFF-Verfahren erinnert an die bekannten Freiform-3D-Drucker à la Doodle3D. Dabei gibt ein Roboterarm das verflüssigte Zweikomponentenmaterial (2K-Polymer) aus, dessen Bestandteile sich unmittelbar nach Austritt aus der Düse verbinden, so wird das Material verfestigt. Damit sind absolut beliebige Formen und Konstruktionen möglich, nur begrenzt durch die Beweglichkeit des Roboterarms ([5], Bild 4).

Support-Material wird bei diesem Verfahren überflüssig. So kann man völlig frei im dreidimensionalen Raum komplexe Objekte herstellen, die mit „normalem“ Objektaufbau so nicht herstellbar wären – vor allem nicht in dem Tempo: 1 Meter in 3 Minuten. Anwendungen gibt es hier z. B. in der Herstellung bestimmter Baukonstruktionen.

Druckverfahren mit Pulver und Draht

Es gibt mehrere moderne Verfahren, die Pulver (verschiedene Materialien von Kunststoff über Keramik bis hin zu Titan) als Objektmaterial einsetzen. Auch hier werden Schichten aufgebaut, aber etwas anders als bei FFF. Beim 3DP-Verfahren etwa, das zu den sogenannten Binder-Jetting-Verfahren zählt, werden Schicht für Schicht Pulver- und Kleber-/Binderschichten in der jeweiligen Form übereinandergelegt und so die einzelnen Pulverebenen miteinander verbunden. Abschließend wird das

Allgemeines Funktionsprinzip des Laser-Sinterns

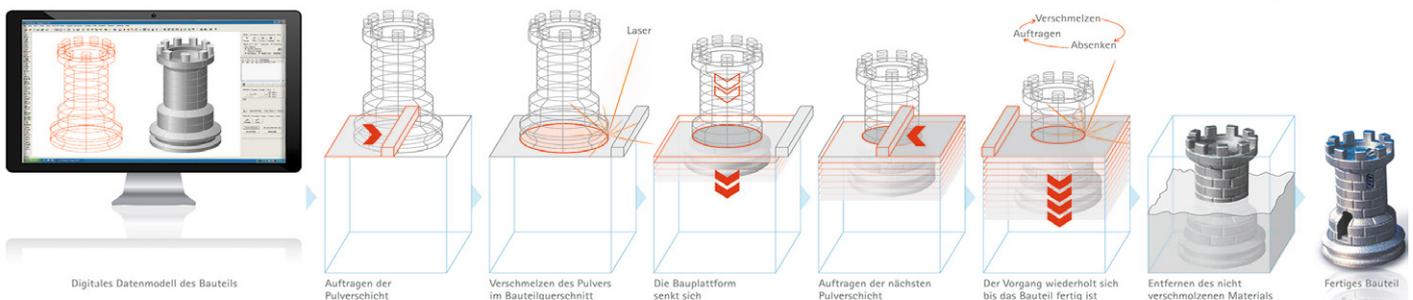


Bild 5: Der Produktionsablauf beim selektiven Laser-Sintern. Foto: EOS GmbH

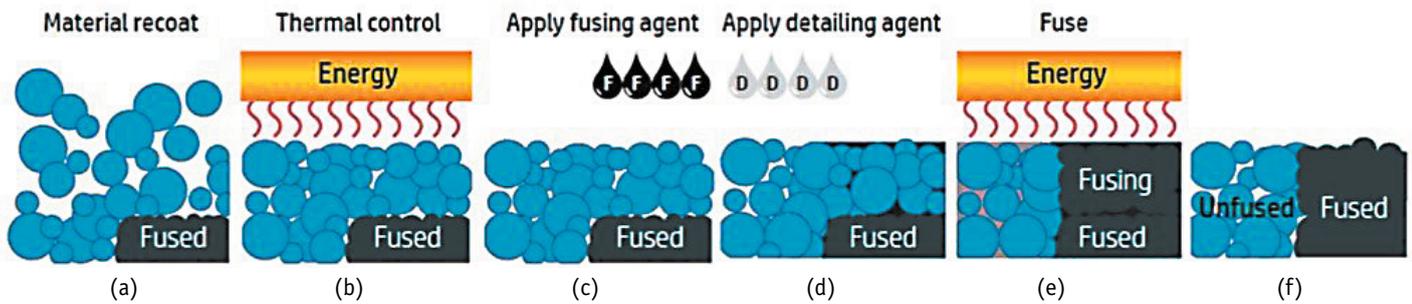


Bild 6: Der HP-Jet-Fusion-Druck-Prozess im Überblick: (a) Auftrag des Druckmaterials, (b) Vorformen durch Wärme, (c)/(d) Auftragen des „Fusing Agents“ und des „Detailing Agents“, (e) Verschmelzen (f). Ergebnis: Das nicht verschmolzene Material kann entfernt werden. Grafik: HP Inc.

Objekt in einen Verfestiger getaucht, um die völlige mechanische Stabilität zu erzeugen. Dieses Verfahren ist sehr gut geeignet, in der Form sehr kompliziert aufgebaute Objekte, etwa mit innen liegenden Hohlräumen, Kanälen etc., sehr sauber und ohne den Zwang zur Nachbearbeitung (z. B. entfallen hier Support-Strukturen) herstellen zu können.

Es geht auch ohne Kleber, etwa beim Selektiven Laser Sintering/Melting (SLS/SLM, siehe Bild 5) oder beim Electron Beam Melting (EBM). Bei SLS/SLM/EBM werden die Pulverschichten mittels Laser- oder Elektronenstrahl direkt miteinander verschmolzen. Bei DED (Direct Energy Deposition) baut man die Objektform über das gezielte Aufschweißen eines Materials (Draht oder Metallpulver) durch Laser/Plasma (Cladding) auf. Diese Verfahren werden industriell für die Herstellung hochdichter Werkstücke, aber auch wegen der hohen Genauigkeit für medizinische Implantate eingesetzt.

Aufgesprüht – Material-Jetting

Das hier vielfach angewandte MultiJet-Modelling-Verfahren (MJM, auch Polyjet-Verfahren genannt) ähnelt dem bekannten Tintenstrahldruck, weshalb es auch nicht verwundert, dass hier z. B. HP als Druckerhersteller vertreten ist. Hier werden über Druckkopfdüsen flüssige fotoempfindliche Materialien wie Kunstharze oder Wachs ausgegeben und sofort durch UV-Licht verfestigt. Dies erfolgt wieder Schicht für

Schicht. Dieses Verfahren ist besonders im Funktionsmodellbau, etwa für anatomische Ausbildungsmodelle beliebt, da hier ein Vollfarbdruck möglich ist.

Bei anderen Verfahren dieser Kategorie können sehr hohe Auflösungen und Mikro-Details erzeugt werden, indem Polymere aufgesprüht werden. Über ausgeklügelte Multi-Düsen-Anordnungen und die Möglichkeiten, verschiedenste Materialien gleichzeitig zu verarbeiten, entstehen komplexe, funktionelle Objekte mit hervorragenden Oberflächeneigenschaften und feinsten Details. HP nennt sein spezielles Verfahren „Multi Jet Fusion“ bzw. „HP Jet Fusion“ (Bild 6). Dabei werden Druck- und Supportmaterialien, sogenannte Agents, über Düsen in Tröpfchenform auf eine dünne Pulverschicht (PA12) ausgegeben. An den Stellen, an denen die „Fusing Agents“ aufgetragen werden, verschmilzt das Pulver bei der anschließenden Hochtemperaturbestrahlung fest und dicht. An den Stellen, an denen die „Detailing Agents“ aufgetragen werden, verschmilzt das Pulver nicht und wird anschließend entfernt. So kann man mit der hoch auflösenden Druckausgabe mit bis zu 1200 dpi sehr detaillierte Objekte erzeugen.

Anwendungen von ganz groß bis Nano

Wie weit dehnbar heute der Begriff „3D-Drucker“ ist, kann man anhand unzähliger Anwendungen in zahlreichen Branchen sehen – vom Riesenbauwerk bis zur Nanotechnologie.

Bauen, Architektur

Erinnern Sie sich noch an die Berichte im Jahr 2014 über das erste Haus, das in Amsterdam ausschließlich per 3D-Drucker gebaut wurde? Inzwischen eines unter vielen. So stellen viele Firmen, wie etwa Contourcrafting, riesige 3D-Drucker auf Baustellen jeder Größe (Bild 7) und



Bild 7: Mit überdimensionalen 3D-Drucker-Anordnungen können heute schon vollautomatisch Gebäude errichtet werden. Grafik: Contourcrafting.com



Bild 8: In 24 Stunden erbaut, Rohbaukosten gerade 4000 Dollar – das von Icon entwickelte Kleinhaus wird mit einer speziellen Lavastein-Zementmischung von einem 3D-Drucker errichtet. Foto: Icon

lassen diese, je nach Baustoff/Material unterstützt mit UV-Licht, arbeiten. Einziges Problem dürfte hier ein kontinuierlich zu gewährleistender Materialfluss sein.

Im Jahr 2018 hat auch das erste innerhalb von 24 Stunden gedruckte und nur 4000 Dollar kostende Wohnhaus der US-Firma Icon ([6], Bild 8) Schlagzeilen gemacht. Es besteht aus einer speziellen Zement-/Vulkanlavamischung („Lavacrete“) als Grundstoff, hat zwei Zimmer, Bad und eine Terrasse und soll sich demnächst in El Salvador als preiswertes Wohnhaus-Hilfsprojekt in einer Siedlung mit 100 gleichartigen Häusern wiederfinden. Als 3D-Drucker kommt der überdimensionale, auf einem Hänger transportierte „Vulcan“-Drucker zum Einsatz, der von Icon entwickelt wurde.

Weltweit arbeiten zahlreiche Architekten und Firmen an den verschiedensten Bauprojekten mit 3D-Druck, bis hin zu Designhäusern, die mit dem 3D-Druck natürlich besonders individuell ausfallen können. Und stabil sind sie auch, wie ein spektakulärer Belastungstest der niederländischen Firma CyBe Construction bewiesen hat (Bild 9). Auf den beiden 3 m hohen Wänden wurden 50 t Gewicht platziert, jetzt geht



Bild 10: Chassis nahezu ausschließlich aus additiv hergestellten Metall-, Kunststoff- und Verbundteilen – der „Divergent Blade“-Sportwagen. Fotos: Divergent3d.com



Bild 9: Hält 50 Tonnen Belastung stand – die 3D-gedruckte Gebäudewand von CyBe Construction. Foto: CyBe Construction

es für die niederländischen 3D-Druck-Architekten an die Tests zur Wasserdichtigkeit, um den Baustoff zu perfektionieren.

Fahrzeugbau, Luft- und Raumfahrt

Die verschiedenen 3D-Druckverfahren erlauben die einfache und schnelle Produktion mechanisch/thermisch hoch belastbarer sowie hybrider und quasi beliebig geformter Bauteile.

Ein interessantes Beispiel machte in den letzten Jahren vor allem auf diversen Automessen Furore: der Divergent Blade (Bild 10) als Demonstrationsobjekt dafür, wie viele Teile man mit modernen 3D-Drucktechnologien heute in einem modernen Leichtbausportwagen verbauen kann. Der Divergent Blade hat ein aus Aluminium und Titan gedrucktes Chassis, eine Karbonkarosserie, wiegt nur 590 kg. Was die Konstrukteure der Konstruktion zutrauen, beweist der Einsatz eines 700 PS starken Sportmotors, der den leichten Sportwagen auf 320 km/h bringt.

Wer übrigens nach weiteren Produkten und Entwicklungen im 3D-Druck-unterstützten Fahrzeugbau sucht, braucht sich nur in Deutschland umzusehen. Einer der Technologieführer sitzt in Taufkirchen – die Airbus APWorks GmbH. Mit dem „Light Rider“ (Bild 11) zeigte die Firma den perfekten Einsatz für ihr spezielles 3D-Druck-Material „Scalmalloy“, eine gemeinsam mit Airbus entwickelte, hochfeste Aluminiumlegierung, die nicht nur korrosionsbeständig ist, sondern auch das geringe Gewicht von Aluminium mit nahezu der spezifischen Festigkeit von Titan vereint. Das Elektrobike wiegt gerade einmal 35 kg, der 3D-gedruckte Rahmen nur 6 kg. Ein Elektromotor beschleunigt das Zweirad in 3 Sekunden von null auf 45 Kilometer pro Stunde. Dass die additive Fertigung einzigartige Designs ermöglicht, zeigt sich am Light Rider. „Eine derart komplex verzweigte Hohlstruktur ist mit konventionellen Herstellungsprozessen wie beispielsweise dem Schweißen oder Fräsen nicht realisierbar“, erläutert Joachim Zettler, Geschäftsführer der Airbus APWorks GmbH. Auch ein weiteres Beispiel, die in Kooperation u. a. mit EOS entwickelte Vorderwagenstruktur eines alten VW Caddy, zeigt das volle Potenzial des industriellen 3D-Drucks für die Automobilindustrie. Mit der kommenden E-Mobilität



gewinnen solche vor allem auch gewichtsparenden Fahrzeugkomponenten zunehmend an Bedeutung.

Noch weiter ist man bereits in der Luft- und Raumfahrt. Seit Langem produzieren 3D-Drucker wie der „110 EBAM System“ von Sciaky (Bild 12), der nach der EBM-Methode arbeitet, komplexe Flugzeugteile, z. B. für den Kampfflieger F-35. Auch Airbus hat den 3D-Druck bereits seit einiger Zeit für sich entdeckt. So fliegt der A330 neo bereits mit Einzelteilen aus dem 3D-Drucker (Bild 13), und in diesem Jahr nahm Airbus Helicopters die industrielle Serienproduktion von A350-Teilen auf (Bild 14). Wie man sehen kann, kommen dabei die verschiedensten Drucktechnologien zum Einsatz, bis hin zu EBM. Kennzeichnend für den Einsatz von 3D-Druck-Verfahren vor allem in der Luft- und Raumfahrt sind die geringen benötigten Stückzahlen, die andere Produktionsarten enorm verteuern würden, und die Fähigkeiten des 3D-Drucks, auch sehr komplexe Objekte additiv herzustellen. Das geht heute bereits bis zu höchst belasteten Teilen wie etwa Raketendüsen, wie es die NASA unlängst gezeigt hat. Hier wurde ein spezielles Verfahren, Laser Wire Direct Close-out (LWDC), angewandt, ein von der NASA entwickelter Freiformprozess (basierend auf Energiedraht-Metallabscheidung, Direct Energy Deposition [7]), bei dem das Material aus einem Draht besteht, der im Freiformprozess durch Laser geformt und additiv aufgebaut wird.

Auch im All kann der 3D-Drucker seine Stärken ausspielen. Einmal als „normaler“ Ersatzteilproduzent, wobei die NASA erst 2018 einen Spezialaufbau zur ISS geschickt hat, der gleich anfallendes Grundmaterial, also Plastikabfall, aufbereitet und daraus Objekte herstellt. So heißt das Gerät denn auch „Refabricator“. Ein anderer Drucker kam erst im zweiten Anlauf auf der ISS an, nachdem ein Sojus-Versorgungsflug gescheitert war – ein Bio-Drucker. Der „ZeroG“ genannte Bioprint-Drucker stammt vom Bioprinting-Spezialisten Allevi. Er produziert mit einem biokompatiblen Material (Hydrogel) eine Struktur, die z. B. einen Zellaufbau für organische Implantate, etwa Haut, produziert. Für zukünftige Marsmissionen strebt man dabei noch viel Weitergehendes an, den Druck ganzer Organe. Womit wir zum nächsten spannenden Anwendungsgebiet kommen.

Medizin

Vermutlich ist die (Bio-)Medizin in all ihren Disziplinen einer der 3D-Druck-Anwender mit der größten Bandbreite an Produkten. Quasi fabrikmäßig geht es in der Zahnmedizin zu – hier dürfte es kaum ein Dentallabor mehr ohne spezialisierte 3D-Drucker geben. Dentaltechniker stellen heute alles her, was man sich nur denken kann, von der Titanstruktur, die ebenso das Gerüst für Implantate bei Knochenschwund bilden kann wie Halte- und Fixierstrukturen, bis hin zum kompletten Implantat. Die Industrie hat hierfür Spezialdrucker und biokompatible Spezialmaterialien entwickelt.



Bild 12: Komplexe, hochbelastbare Teile, z. B. für Flugzeuge, entstehen auf überdimensionalen EBM-Maschinen. Foto: Sciaky



Bild 11: Der Light Rider von APWorks zeigt, dass auch komplizierteste Strukturen per 3D-Druck realisierbar sind. Foto: APWorks

Besonders interessant ist hier eine Richtung, die derzeit Forscher an der Medizinischen Hochschule Hannover und der Leibniz-Universität Hannover mit dem „Biologischen Zahnersatz“ einschlagen (allein in Deutschland besteht nach Aussagen der Forscher vor allen aufgrund von Karies und Parodontitis ein Bedarf von 14 Millionen Zähnen jährlich). Sie drucken zunächst Zähne in der genau dem Original entsprechenden Form, wie ein künstliches Implantat also (Bild 15). Danach werden diese Strukturen in einem Bioreaktor als künstliche Gerüstmaterialien eingesetzt, auf denen sich dentale Stammzellen ansiedeln, die dem Patienten zuvor entnommen wurden. So wird zukünftig, gegenüber dem normalen, statisch eingebauten (verschraubten) Implantat, der gesamte Halteapparat des Zahns inklusive der flexiblen, natürlichen Halterung im Kiefer wiederhergestellt. Mit dieser Methode ergeben sich bisher ungeahnte weitere Möglichkeiten, wie der Druck von Halsschlagadern, Knochenersatz, Bandscheiben etc.

Stichwort Knochenersatz – daran arbeiten Medizinforscher ebenso intensiv wie am Zahnersatz. Da-



Bild 13: 3D-gedruckte Teile finden sich heute überall im modernen Flugzeugbau, hier an einem Airbus A330. Foto: Airbus

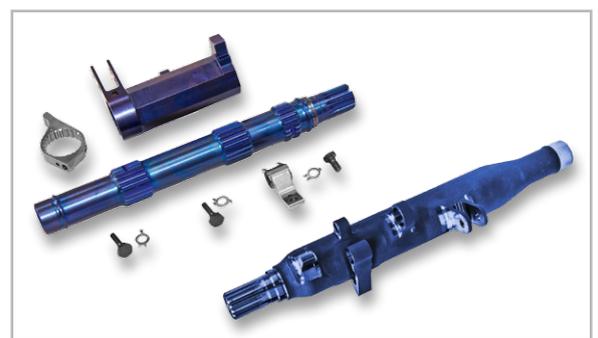


Bild 14: Anfang 2019 lief die Serienfertigung für Airbus-Flugzeug- und Helikopterteile an. Foto: Airbus



Bild 15: Ziel: Der Kunstzahn mit natürlicher Anbindung an den Körper – die Forscher der MHH und der Leibniz-Universität Hannover arbeiten daran. Fotos: MHH-/Leibniz-Universität für wissen.hannover.de



Bild 16: Beispiel für ein Rückenmarkimplantat aus porösem Titan mit feinsten Mikro- und Nanostrukturen. Foto: EIT Emerging Implant Technologies



Bild 17: Replika eines Oberschenkelknochens aus Keramik. Foto: Fraunhofer IKTS

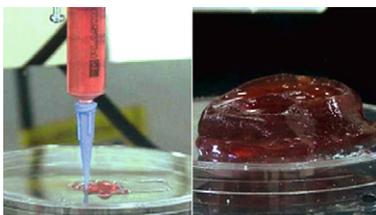


Bild 18: Die Herstellung ganzer Organe und Organteile nimmt immer konkretere Gestalt an. Foto: Morriston Hospital Wales

bei hat der 3D-Druck quasi den ganzen Körper erobert. So hat erst Mitte März 2019 ein Ärzteteam an der Universität von Pretoria [8] ein im 3D-Drucker aus Titan hergestelltes Mittelohr-Implantat eingesetzt und so einem Patienten das Gehör wiederhergestellt.

Einfache Knochenteile und Prothesen sind heute schon Alltagsgeschäft vieler medizinischer und Materialforschungsinstitute und den oft daraus hervorgehenden Start-ups, die die enormen Möglichkeiten dieser Technik sehen. Aus den mittlerweile jahrelangen Erfahrungen mit der Produktion dieser Teile erwachsen heute ganz neue Gebiete, wie eben die schon aufgeführte Verbindung zur Biomedizin und Biochemie. Immer mehr geht die Integration von Implantaten in die Richtung der Verschmelzung mit natürlichen Strukturen, um z. B. auch gezielt Lasten abzubauen und zu verteilen oder das Knochenwachstum anzuregen. So übertragen die Implantate Mikrobewegungen, wie sie im natürlichen Knochen vorkommen, ermöglichen die Strukturanpassung durch eingebaute, flexible Mikrostrukturen. Bild 16 zeigt ein solches Beispiel für ein Rückenmarkimplantat aus porösem Titan mit feinsten Mikro- und Nanostrukturen, das die süddeutsche Firma EIT erst jüngst vorgestellt hat [9].

Andere Forscher arbeiten an Knochenstrukturen, die sich in die körpereigene Knochen-substanz wandeln und somit als eigentlich künstliches Implantat verschwinden sollen. Die Forscher am Fraunhofer Institut IKTS in Dresden haben solch eine, an Schaumstoff erinnernde Struktur entwickelt, die mit einer 3D-gedruckten Knochenhülle umgeben ist. Mit dem ausgewählten 3D-Druckverfahren der Lithografie-basierten keramischen Fertigung (LCM) gelang es, einzelne Röhren, Halbschalen und komplexe knochenähnliche Hüllen zu drucken, und das aus den gleichen Materialien wie die poröse Schaumkeramik (Bild 17). Die am Fraunhofer IKTS entwickelten keramischen Implantate könnten so künftig eine vielversprechende Lösung für die wiederherstellende Chirurgie sein, zum Beispiel bei Knochenkrebspatienten oder im Bereich Mund, Kiefer und Gesicht.

Noch spannender ist eigentlich nur die bereits angeschnittene Fertigung von Geweben und Organen aus biologischen Lösungen und lebenden Zellen, verbunden mit bzw. aufgebaut auf Hydrogel-/Collagen-Strukturen. So gelang es Forschern der Tel Aviv University erst im April 2019, im 3D-Drucker ein künstliches Mini-Herz [10] herzustellen, das im Grunde aus speziell bearbeitetem menschlichem Gewebe und Blutgefäßen des Patienten besteht und so keine Immun-Gegenreaktion auslösen kann. Ein interessantes Gebiet ist die Herstellung von Hautnachbildungen bzw. -geweben (Tissue Engineering) oder von Blutgefäßen, wie es z. B. Forschern der Pohang University of Science and Technology in Südkorea gelang. Auch hier werden in einem mehrstufigen Prozess 3D-Druck und Bioreaktionen verbunden und so nahtlos integrierbare und funktionsfähige Blutgefäße und Hautnachbildungen hergestellt.

Mithilfe von per 3D-Druck hergestellten Basisstrukturen, verbunden mit lebenden Zellen, gelingt es immer öfter, ganze Organteile herzustellen, wie etwa das Ohr-Beispiel in Bild 18 zeigt, das von Forschern des Morriston Hospitals in Wales hergestellt wurde [11]. Bahnbrechend dürfte auch das Vorgehen von Dr. Anthony Atala vom Bostons Children's Hospital sein. Er entnahm einem kranken Patienten ein kleines Stück seiner Blase und baute auf einer 3D-Struktur innerhalb von zwei Monaten ein komplettes neues Organ auf, das anschließend dem Patienten implantiert wurde.

Welch komplexe Strukturen hier schon möglich sind, zeigt das künstlich gedruckte, mehrfach verzweigte Blutgefäß, das am Fraunhofer ILT in Aachen entstand. Die Kombination von Stereolithografie und Multiphotonen-Polymerisation macht es möglich: Wissenschaftler des Fraunhofer-Instituts ILT entwickelten eine Maschine für hochpräzise, wirtschaftliche 3D-Aufbautechniken, die beide Verfahren nutzt. Längst gibt es auch Spezialhersteller für Bio-3D-Drucker wie etwa Allevi (Bild 19), die sowohl genau auf ihre

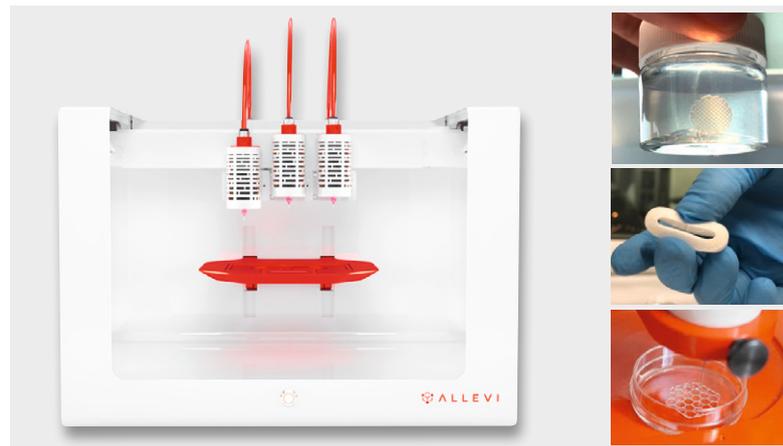


Bild 19: Allevi stellt eine ganze Serie von Bioprint-Druckern sowie zahlreiche Aufbau- und Zusatzmaterialien zur Verfügung. Foto: Allevi



Aufgabe zugeschnittene Drucker als auch Materialien anbieten, um den Medizinern das Werkzeug für ihre Vorhaben an die Hand zu geben.

Nanotechnik

Es gibt noch zahlreiche weitere Einsatzgebiete für 3D-Drucker, so z. B. im Nahrungsmittelbereich. Ein interessantes Gebiet betreten die Techniker und Forscher aber auch mit dem Einsatz in der Nanotechnik, die natürlich thematisch eng mit der Medizintechnik verbunden ist. Eine gewichtige Rolle spielt hier die deutsche Firma Nanoscribe [12], die sich mit ihren Druckern, insbesondere dem aktuellen „Photonic Professional GT2“, auf dem Gebiet des Nano-Drucks einen Namen gemacht hat. Dessen Anwender realisieren mit dieser Maschine komplexe und maßgeschneiderte 3D-Mikro-Werkzeuge, -Sensoren, und -Maschinen. Bild 20 zeigt einige der Möglichkeiten dieses 3D-Druckers, der mit einer breiten Palette von Materialien wie Fotolacken, Hydrogelen und individuellen Materialien umgehen kann. Mit dieser Vielfalt können unterschiedlichste Bauteile und Strukturen gedruckt werden – für Mikrooptik, Photonik, Bioengineering oder für mikroelektromechanische Systeme (MEMS).

Das Arbeitsprinzip dieses Druckers basiert auf der Kombination verschiedener Prozesse, bei der fotosensitive Materialien durch hochpräzise Laserstrahlung polymerisiert werden. Im Unterschied zu anderen Verfahren ist hier im FBMS-Prozess der Laser fest und mit einem hochgenau eingestellten Fokus positioniert, bewegt wird das Substrat, und zwar mit einer hochpräzisen Positioniereinheit. Beim „Moving-beam fixed-substrate“-Verfahren (MBFS) dagegen wird der Laserfokus in der Ebene des Substrats durch Galvanospiegel abgelenkt und die vertikale Substratbewegung durch Piezoaktuatoren gesteuert. Durch diesen Lage-für-Lage-Strukturierungsprozess werden sehr hohe Fertigungsgeschwindigkeiten ermöglicht.

Nicht nur bei den fotosensitiven Verfahren, auch bei den Sinterverfahren ist die Mikro- und Nanotechnik längst vom 3D-Drucker besetzt. Hochfeste Teile in höchster Präzision sind hier das Ergebnis. Aus Deutschland macht zum Beispiel die Firma 3D MicroPrint aus Chemnitz [13] von sich reden. Sie beherrscht mit ihren Maschinen den Micro-Laser-Sinter-Prozess, der im Grundsatz genauso abläuft, wie in Bild 5 zu sehen, so perfekt, dass z. B. sogar saubere Mikrokanäle in Minisonden realisierbar sind, wie es in den Anwendungen in Bild 21 zu sehen ist.

Diese Aufstellung von aktuellen Anwendungen des 3D-Drucks kann nicht vollständig sein. Sie zeigt aber, wie weit dieses additive Fertigungsverfahren in unser tägliches Leben eingegangen ist und welches Potenzial noch in dieser Technik steckt. **ELV**

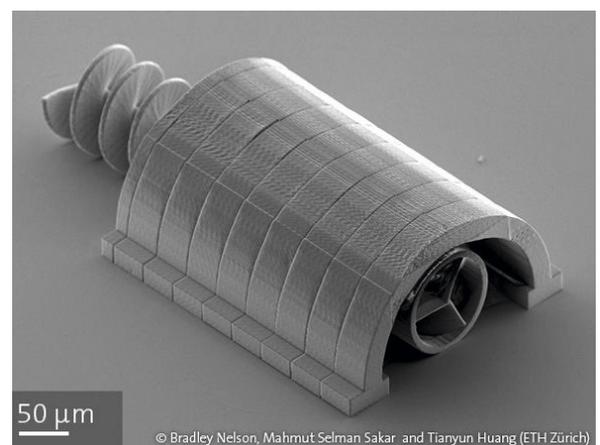
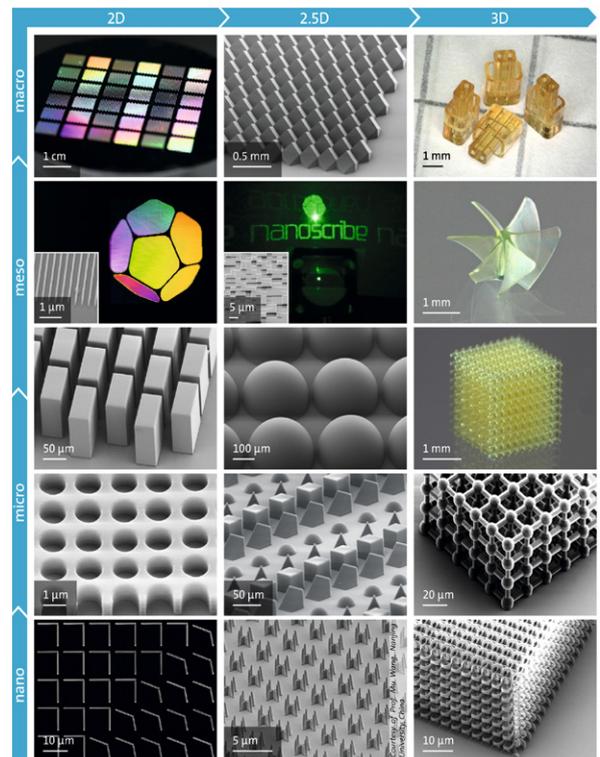


Bild 20: Spezialist für die additive Produktion von Mikro- und Nanostrukturen – der Photonic Professional GT2 von Nanoscribe. Unten eine Mikromaschine, die an der ETH Zürich mit dieser Maschine hergestellt wurde. Foto: Nanoscribe GmbH/ETH Zürich



Weitere Infos:

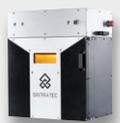
- [1] www.elv.de: Webcode #10252
- [2] www.reprap.org/wiki/RepRap
- [3] www.elv.de: Webcode #10252
- [4] www.arburg.com/de/
- [5] www.mataerial.com
- [6] www.iconbuild.com
- [7] www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directedenergydeposition/
- [8] www.up.ac.za/news/post_2750323-up-academic-pioneers-worlds-first-middle-ear-transplant-using-3d-printed-bones
- [9] www.eit-spine.de
- [10] https://english.tau.ac.il/news/printed_heart
- [11] www.wales.nhs.uk/sitesplus/863/news/39869
- [12] www.nanoscribe.de
- [13] www.3dmicrop rint.com



Bild 21: Mit der Beherrschung des Micro-Laser-Sinter-Prozesses sind auch im Sinterbereich mikrofeine Strukturen realisierbar. Foto: 3D MicroPrint



Additive Fertigungsverfahren – die wichtigsten Verfahren in der Übersicht

Beschreibung	Materialien	Maschinen	Produkte
1. Schmelzsichten: Fused Filament Fabrication (FFF) bzw. Fused Deposition Modelling (FDM)			
<p>Schmelzbare Materialien (Filament/Sticks) werden einem Extruder zugeführt, in dem sie bis zum Schmelzen erhitzt und durch eine Düse ausgegeben werden. Auf einer Druckplattform wird das Material Schicht für Schicht aufeinandergelegt. Die Schichten werden durch die Wärme miteinander verschmolzen. Anschließend erfolgt selektives Abkühlen, um die Formstabilität zu gewährleisten. Das Erzeugen von Hohlräumen und Überhängen kann durch Stützmaterialien unterstützt werden. Die Haftung des Druckobjekts kann durch eine heizbare Druckplattform oder Spezialmaterialien für die Druckplattform, z. B. BuildTak/Durable Build, bzw. Beschichtungen (Haft-/Sprühkleber, PET-, BlueTape-, Kapton-/Polyamid-Klebeband) verbessert werden.</p>	<p>PLA, ABS, ASA, NYLON, PC, PP, PETG/PET, PVA, HIPS</p> <p>Je nach Maschine weitere Materialien wie Lebensmittel, Holz (Holzmehl-/Harz), Ton, Gips, Beton sowie Hybridmaterialien wie leitfähige, magnetisierbare ESD- und Mehrmaterialmischungen, z. B. mit Beimengungen von Metall oder Kohlefaserzusatz, bedruckbare und reflektierende Materialien verarbeitbar</p>	<p>FFF-/FDM-Drucker mit einem oder mehreren Extrudern/ Druckköpfen. Bei mehreren Druckköpfen sind Stützmaterialien mit verarbeitbar, auch Mehrfarbdruck und Mischung mehrerer Materialien sind möglich. Bei einigen Spezialfilamenten wie z. B. Kohlefaser sind gehärtete Düsen/Extruder notwendig. Drucktemperaturen je nach Material 180–250 °C</p>	 <p><i>Ultimaker 3 Bestell-Nr. 12 74 41</i></p>
2. Stereolithografie: SLA/DLP			
<p>Die erste und älteste 3D-Druck-Technologie. In einem Vorratsbehälter befindet sich flüssiges, lichtempfindliches Harz, das von einem bewegten Laserstrahl (schichtweise) oder einem DLP-Projektor bzw. Beamer (Fertigung schichtweise oder in einem Stück) belichtet und so ausgehärtet wird. Die fertige Schicht wird in den Tank hineingezogen, sodass die nächste Schicht belichtet werden kann. Am Schluss wird das Objekt aus dem Behälter mit flüssigem Harz entfernt und je nach System nachbelichtet bis zum kompletten Aushärten. Besonders für hochwertige, glatte und sehr fein strukturierte Oberflächen geeignet.</p>	<p>Flüssiges Kunstharz/Resin</p>	<p>SLA-Drucker für schichtweises Drucken mit Laser DLP-Drucker für schichtweises Drucken mit „Digital Light Processing (DLP)“-Projektor DPP-Drucker für selektives Härten von tageslichtempfindlichen Harzen mithilfe eines LCD-Bildschirms. DPP = Daylight Polymer Printing</p>	 <p><i>Formlabs Form 2 Bestell-Nr. 12 22 68</i></p>
3. Multi Jet Modelling: MJM/MJP/Polyjet			
<p>Hier werden über Druckkopfdüsen flüssige fotoempfindliche Materialien wie Polymere, Kunstharze oder Wachs ausgegeben und sofort durch UV-Licht verfestigt. Dies erfolgt Schicht für Schicht. Verschiedene Materialien durch Multidüsen-Anordnungen gleichzeitig verarbeitbar. Beim HP-Verfahren „Multi-/HP Jet Fusion“ werden die zu verfestigenden bzw. später zu entfernenden Bereiche einer dünnen Pulverschicht durch aufgetragene Agents festgelegt und anschließend durch Temperatur gehärtet. Für Objekte mit sehr hochwertigen Oberflächen und feinsten Strukturen.</p>	<p>Fotoempfindliche Materialien, Photo-Polymere, Wachse, Pulver (PA12)/Agents</p>	<p>MJP-Drucker für Photo-Polymer oder Wachs MJJ-Drucker für PA12-Pulver und Agents</p>	 <p><i>Poly-Jet-Drucker HP Jet Fusion 580 Color Bild: HP Inc.</i></p>
4. Pulverdruck: 3DP			
<p>Auf eine dünne Pulverschicht wird mit Düsen eine Klebeschicht in den Formen des Druckobjekts aufgetragen, dann die nächste Pulverschicht, die nächste Kleberschicht usw. Zum Schluss wird überschüssiges Pulver entfernt und ggf. nachgehärtet. Für dichte, robuste und filigrane Objekte. Mehrfarbfähig durch unterschiedlich gefärbte Kleber.</p>	<p>Kunststoff- und Metallpulver, Keramikpulver, Glas, Polymergeps</p>	<p>3DP-Drucker für Pulverdruck</p>	 <p><i>3DP-Drucker Metal X Bild: Markforged</i></p>
5. Selektives Laser-Sintern/Laser Melting: SLS/SLM			
<p>Jeweils eine dünne Pulverschicht wird mit einem beweglichen Laserstrahl in den Objektkonturen unter Schutzgas verschmolzen, die Plattform dann abgesenkt, die nächste Pulverschicht aufgetragen, wieder verschmolzen usw. Zum Schluss wird überschüssiges Pulver entfernt.</p>	<p>Kunststoff-Pulver Polyamid (z. B. PA12), für bestimmte Eigenschaften mit Zusatzstoffen wie Glasfaser, Aluminium oder Karbon versehen, Elastomere für flexible Objekte, Metallpulver, Keramikpulver</p>	<p>SLS-Pulverdrucker</p>	 <p><i>SLS-Drucker Sintratec Kit Bild: Sintratec AG</i></p>
6. Electron Beam Melting: EBM/DED			
<p>EBM ähnelt in der Grundform dem SLS-Verfahren, hier schmilzt jedoch ein in der Ablenkung variabler Elektronenstrahl das Pulver unter Vakuum. Der Vorteil des Verfahrens ist die Möglichkeit, hochdichte Metallteile schnell und ohne thermischen Verzug zu fertigen. Hier werden allerdings gegenüber SLS Stützstrukturen benötigt, die Nachbearbeitung erfordern. Bei DED wird ein Materialdraht oder ein Pulver durch Laser- oder Plasmaschweißen für den Objektaufbau eingesetzt.</p>	<p>EBM: Standard-Metallpulver DED: Materialdraht oder Metallpulver</p>	<p>EBM-Drucker DED-Drucker</p>	 <p><i>DED-Drucker BeAM Magic 800, Bild: BeAM</i></p>



3D-Druckmaterialien für FFF/FDM-Druck

Material	Eigenschaften	Verarbeitung	Sonstiges, Lagerung
ABS	Formstabil, elastisch, schlagzäh, stoßfest, hohe Oberflächenhärte, temperaturbeständig, elektrisch leitende Versionen verfügbar. Spezialfilamente mit Metall- und Holzoptik, nachleuchtend, farbwechselnd, leitfähig verfügbar	Schmelztemperatur: 220–250 °C Erfordert beheizbare Druckplatteform (80–100 °C) Kühlung abschalten Oberfläche kann mit Aceton geglättet werden	Starke Geruchsemission – auf ausreichende Lüftung achten! Neigt zum Verzug (Warping) und Schrumpfen, geschlossener Bauraum empfohlen Luftdicht, möglichst vakuumverpackt lagern
ASA	Ähnlich wie ABS, jedoch langzeitbeständiger gegen UV-Strahlung	Schmelztemperatur: 220–250 °C Kühlung abschalten Erfordert beheizbare Druckplatteform (80–100°C)	Starke Geruchsemission – auf ausreichende Lüftung achten! Styrolhaltig – giftige Abgase beim Erhitzen! Neigt zum Verzug (Warping), geschlossener Bauraum empfohlen Luftdicht, möglichst vakuumverpackt lagern
Flüssigharz	Epoxidharz/Resin für SLA-Drucker, in verschiedenen Zusammensetzungen (gefärbt, farblos, flexibel) verfügbar, UV-empfindlich, spröde	Aushärtung mit Laser-/UV-Licht Gedrucktes Objekt muss u. U. mit Isopropylalkohol ausgewaschen werden Gegen schnelle Alterung mit UV-Schutzlack behandeln	Mit Farbpigmenten versetzbar, kühl und dunkel lagern
Gemische	Materialgemische, meist von PLA/ABS mit Materialien, die eine besondere Farbgebung bzw. besondere Eigenschaften haben Beispiele: Glow in the Dark: leuchtet im Dunkeln nach Wood/Laywood: mit Holzmehl gefüllt, Holzoptik Stone: mit Steinmehl gefüllt, Steinoptik Carbon: mit Kohlefasern gefüllt, hohe Längsbelastung Metal: mit Metallpulver gefüllt Conductive: stromleitend	Schmelztemperatur: 180–235 °C, für die Verarbeitung Hinweise der Hersteller beachten	Stark herstellerspezifische Eigenschaften
HIPS	High Impact Polystyrene, lösliches Stütz-/Supportmaterial, auch nach dem Druck stabil und stoßfest, lebensmittelecht, gut mit ABS kombinierbar	Schmelztemperatur: 220–235 °C mit Limonenextrakt-Lösung herauswaschbar	Starke Geruchsemission – auf ausreichende Lüftung achten! Geschlossener Bauraum empfohlen Luftdicht, möglichst vakuumverpackt lagern
Nylon	Hart, zäh, bruchfest und hoch abriebfest, chemikalienbeständig, hervorragende Schichtenhaftung	Schmelztemperatur: je nach Hersteller 220–260 °C Neigt je nach Typ zum Ablösen, deshalb mit erhöhter Heizbetttemperatur (90 °C) drucken, ggf. Kühlung abschalten Raue Oberfläche, muss geglättet werden	Stark hygroskopisch – luftdicht, möglichst vakuumverpackt lagern
PC	Polycarbonat, hoch widerstandsfähig, hoch temperaturbeständig	Schmelztemperatur: 260–310 °C Erfordert beheizbare Druckplatteform (80–110 °C)	Stark hygroskopisch – luftdicht, möglichst vakuumverpackt lagern
PETG/PET	Polyethylen-Terephthalat/Glykol, klare Optik, lebensmittelecht, hoch belastbar, hydrophob, flexibel, schlagzäh, chemikalienbeständig, geringes Warping (Verzug), lebensmittelecht	Schmelztemperatur: 220–235 °C ohne Druckbettheizung verarbeitbar, mit Heizung (60–80 °C) sehr gute Haftung	Je nach Fabrikat kann PETG beim Abkühlen leicht schrumpfen
PLA/PHA	Poly lactide, umweltfreundlich, biologisch abbaubar (Basis: Milchsäure), einfach handhabbar, geringes Warping (Verzug). Spezialfilamente mit Metall- und Holzoptik, nachleuchtend, farbwechselnd, leitfähig verfügbar PHA wird oft als Zusatz zu PLA beigemischt, um eine erhöhte Widerstandsfähigkeit gegen UV-Strahlung zu erreichen	Schmelztemperatur: 180–210 °C Ohne Druckbettheizung verarbeitbar	Geringe Geruchsemission Hygroskopisch (luftdicht mit Trockenmittel lagern)
PP	Polypropylen, leicht, thermisch-chemisch stabil, lebensmittelecht, ermüdungsfest gegen Verformung, mechanisch stabil auch bei dünnen Objekten, langlebig, hohe Zähigkeit	Schmelztemperatur: 200–240 °C Beheizbare Druckplatteform (80–90 °C) empfohlen Bei Überhängen Stützmaterial erforderlich	Je nach Fabrikat Spülmaschinen- und Mikrowellenfest Zum Einstieg spezielle Druck-Kits empfehlenswert, da PP eine geringe Schichtenhaftung hat und stark zum Verzug/Warping neigt
PVA	Polyvinyl-Alkohol, wasserlösliches Stützmaterial, nach dem Druck mit Wasser herauswaschbar	Schmelztemperatur: 180–210 °C, ohne Druckbettheizung verarbeitbar	Hygroskopisch (mit Trockenmittel luftdicht, besser im Vakuum lagern)