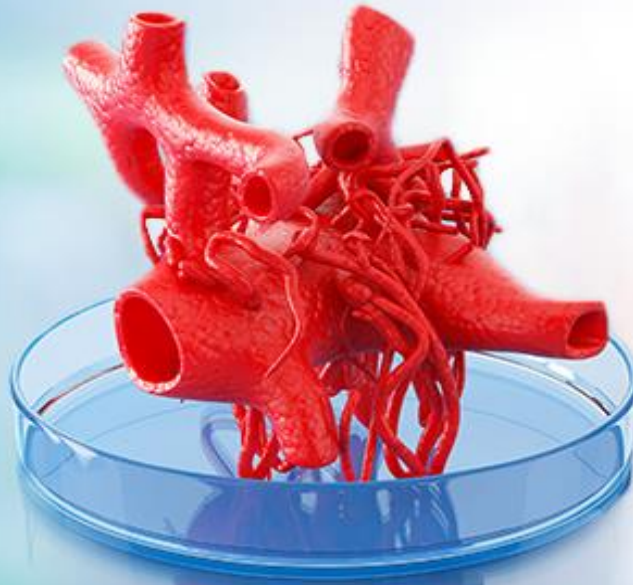




LO2 DIE ANWENDUNG VON 3D-DRUCK UND IKT FÜR GRÜNE PRODUKTE UND PROZESSE

Basisniveau

AUTOR:

TRAYANA NEDEVA



Inhalt

Funktionsprinzipien des 3D-Drucks.....	3
Definitionen.....	3
Kurze Geschichte des Feldes.....	5
Vor- und Nachteile des 3D-Drucks als Fertigungsverfahren	6
Grundlagen der 3D-Druckverfahren und Materialien	8
Arten von 3D-Druckverfahren	8
Nachbearbeitungsanforderungen für verschiedene 3D-Drucktechnologien	17
Welches Verfahren für was? Grundlegende Überlegungen bei der Auswahl der für eine bestimmte Anwendung geeigneten 3D-Drucktechnologie	18
Häufig verwendete Software für den 3D-Druck	20
Gestaltungsrichtlinien für den 3D-Druck.....	21
Verweise.....	24

Funktionsprinzipien des 3D-Drucks

DEFINITIONEN

Der 3D-Druck erzeugt ein greifbares Objekt, indem aufeinanderfolgende Schichten hinzugefügt werden, die Querschnitte des Objekts darstellen. Die einfachste Anspielung darauf ist die Herstellung eines Schichtkuchens (Abb. 1), nur dass die Schichten zahlreich und typischerweise sehr dünn sind, nur etwa 1/5 des Millimeters.



A.



B.

Abbildung 1. Schichten und Schichtung im 3D-Druck.

A - Geschichteter Kuchen, der das Grundprinzip des 3D-Drucks darstellt. Quelle:

Caroline's Cakes - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12799030>

B - 3D-gedrucktes Schokoladenschloss. Quelle: FM1418, CC BY-SA 4.0

<<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>>, via Wikimedia Commons

Der 3D-Druck ist sowohl vom Verfahren als auch vom Material her dem routinemäßigen 2D-Druck mit Tinte und Papier sehr ähnlich.

Dennoch wird beim typischen 2D-Druck nur eine Illusion von Tiefe durch Perspektive und Farbe oder Graustufen erzeugt, während beim 3D-Druck greifbare 3D-Objekte entstehen. Diese können eine Vielzahl von Zwecken haben, von der schnellen Erstellung von Prototypen für Forschung und Industrie bis hin zu gedruckten Objekten für den alltäglichen oder speziellen Gebrauch; Maschinenteile; maßgeschneiderte kulinarische Artikel wie das in Abb. 1B dargestellte Schokoladenschloss; gedruckte

2019-1-BG01-KA203-062371

implantierbare Materialien für die regenerative Medizin und möglicherweise "Ersatzteile" für den menschlichen Körper; und neuartige Formen der Kunst.

Ein einfacher Desktop-3D-Drucker mit PC ist in Abb. 2 dargestellt.

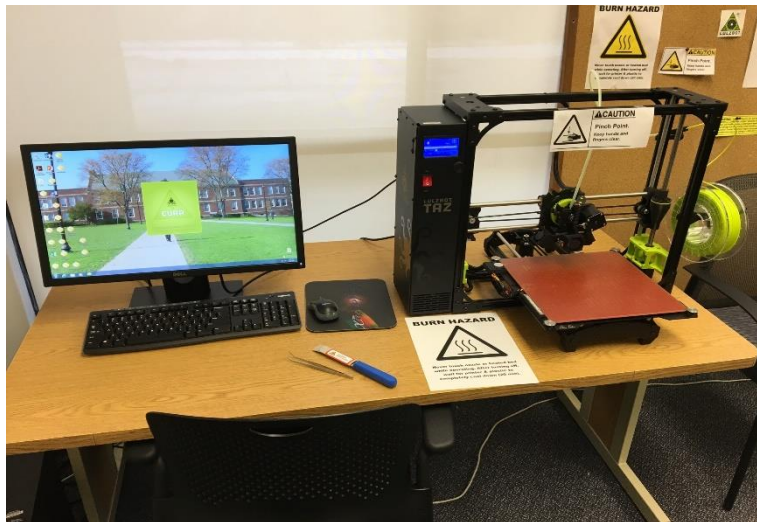


Abbildung 2. LulzBot TAZ (FAME 3D, Fargo, ND, USA), eine Open-Source-3D-Druckmaschine auf Basis der FDM-Technologie. Quelle: Ochs, J. - Hochschule, CC BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=59898086>

Normalerweise ist der Prozess des 3D-Drucks eines Objekts additiv (daher wird der 3D-Druck auch als "additive Fertigung" bezeichnet). Dabei werden Schichten über Schichten eines druckbaren Materials (allgemein als "3D-Tinte" bezeichnet) aufgetragen, bis das Objekt vollständig ist.

3D-gedruckte Objekte müssen nicht in sich massiv sein (obwohl sie es sein könnten). Sie können jede Art von Hohlräumen enthalten, die in der für den Druck verwendeten Datendatei eingerichtet wurde, da jede Schicht einen Querschnitt auf einer bestimmten Ebene im hergestellten Objekt darstellt.

Ein kurzes Zeitraffer-Gif, das den grundlegenden Prozess des 3D-Drucks veranschaulicht, kann hier angesehen werden:

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ed/Robot_3D_print_timelapse_on_RepRap_Pro_Fisher.gif

Der heutzutage am häufigsten verwendete 3D-Druck ist das Fused Deposition Modeling (FDM), obwohl andere Arten schnell an Popularität gewinnen.



KURZE GESCHICHTE DES FELDES

Es wird allgemein angenommen (und zitiert), dass die Idee des 3D-Drucks erst in den 1950er Jahren entstand, als der Science-Fiction-Autor Raymond F. Jones eine Kurzgeschichte veröffentlichte, in der er den Einsatz von "molekularem Spray" beschrieb, das durch Informationen von einem zuvor aufgezeichneten Datenband gesteuert wurde. Nichtsdestotrotz wurde die Möglichkeit der kontrollierten, freihändigen Herstellung eines komplexen, greifbaren Objekts, das virtuellen Anweisungen folgt, etwa 50 Jahre zuvor von dem großen Visionär Joseph Rudyard Kipling in seiner Kindergeschichte "Wie das Kamel seinen Humph bekam" vorhergesehen. Der erste Versuch des 3D-Drucks kam jedoch erst in den 1970er Jahren, und er beinhaltete sowohl die Erstellung als auch die Entfernung von Objekten. Konkret handelte es sich dabei um den patentierten 'Liquid metal recorder' von Johannes F. Gottwald (US3596285A), der elektrisch leitende metallische Tinte verwendete, die unter Druck gegen eine Oberfläche getrieben wurde. Die geschmolzene Tinte würde bei Drucktemperatur fließen, sich aber verfestigen, wenn sie mit der Oberfläche in Berührung kommt. Dann könnte sie durch Erhöhen der Temperatur über den Schmelzpunkt entfernt werden, was die Wiederverwendung der Tinte und der Oberfläche zur weiteren Verwendung ermöglicht.

Wie bei den meisten neuartigen Konzepten hatte auch die Idee des 3D-Drucks keinen frühen Erfolg. In den frühen 1980er Jahren wurde von Hideo Kodama in Japan ein Patent für die additive Herstellung eines "stereoskopischen Figurenzeichners" unter Verwendung von UV-härtendem Polymer angemeldet, bei dem die Bereiche der UV-Bestrahlung durch ein vorgegebenes Maskierungsmuster gesteuert wurden (JP S56144478 A). Trotz der zeitnahen Veröffentlichung seiner Ergebnisse konnte Kodama kein großes Interesse an seinem Projekt wecken und es wurde daraufhin eingestellt.

Vier Jahre später ereilte in Frankreich das gleiche Schicksal das von Le Méhauté, de Witte und André vorgestellte Konzept für die Stereolithographie und das anschließende Patent für das Verfahren, angeblich "mangels wirtschaftlicher Perspektive" [<http://www.primante3d.com/inventeur/>].

Etwa zu dieser Zeit meldete der Amerikaner William E. Masters das erste einer Reihe von Patenten an (nämlich das Patent für "Computer Automated Manufacturing Process and System" (US 4665492), das schließlich den Grundstein für den 3D-Druck, wie wir ihn kennen, legte.

Nur zwei Jahre später erhielt der Amerikaner Charles Hull ein Patent für einen eigenen "Apparat zur Herstellung von Stereolithographen" (US4575330A), gründete seine eigene Firma und brachte schließlich 1987 den ersten kommerziellen 3D-Drucker, den SLA-1, auf den Markt. Das Patent für die heute am häufigsten verwendete Art des 3D-Drucks - den FDM - wurde 1989 in den USA von S. Scott Crump angemeldet (US5340433A) und das erste FDM-Gerät kam 1992 auf den Markt. Hull gab auch die bis heute wohl einfachste und dennoch vollständige Definition des 3D-Drucks, nämlich: "*A system for generating three-dimensional objects by creating a cross-sectional pattern of the object to be formed...*", in der Beschreibung seines Patents für "Method for production of three-dimensional objects by stereolithography" (US5174943A).



VOR- UND NACHTEILE DES 3D-DRUCKS ALS FERTIGUNGSVERFAHREN

Die Verwendung des 3D-Drucks bietet zahlreiche Vorteile gegenüber herkömmlichen Fertigungsmethoden. Einige davon sind im Folgenden aufgeführt:

1. Komplexe Konstruktion

Da das Objekt nicht aus einem Block ausgeschnitten wird, kann der 3D-Druck verschiedene Designs mit sehr komplexer Struktur verarbeiten.

2. Möglichkeiten für Änderungen in letzter Minute.

Das Design ist leicht modifizierbar und eine Vielzahl von verschiedenen Prototypen eines Objekts kann schnell hergestellt und getestet werden.

3. Einfache und schnelle Anpassung des Designs an die individuellen Bedürfnisse

Im Gegensatz zu herkömmlichen Fertigungsmethoden betrifft die Einführung notwendiger Änderungen eher die Dateien als die Maschine selbst und kann mit sehr geringer Vorankündigung durchgeführt werden.

4. Ergibt leichte und langlebige Objekte

Das hängt vom verwendeten Material ab, aber die meisten kommerziellen 3D-Drucker verwenden Kunststoff, obwohl auch die Verwendung anderer Materialien wie Gips, Metall, Metalllegierungen usw. möglich ist.

5. Relativ schnelle Produktion in kleineren Maßstäben

Je nach Größe und Komplexität des Entwurfs können die meisten Objekte innerhalb von Stunden hergestellt werden, obwohl größere Objekte mehr Zeit in Anspruch nehmen können.

6. Geringer (im Vergleich zu traditionellen Herstellungsverfahren) Materialabfall

Auch hier ist der Materialverlust vernachlässigbar gering, da kein Schneiden, Bohren oder Ausbohren stattfindet. Eine Ausnahme bildet der pulverbasierte 3D-Druck, bei dem überschüssiges Pulver in der Regel verloren geht.

7. Kann kostengünstiger sein als traditionelle Herstellungsmethoden

Das hängt im Wesentlichen vom Material und dem zur Herstellung verwendeten Verfahren ab.

8. Der Zugang von Forschern, der Industrie und der Öffentlichkeit zu 3D-Druckern wird immer einfacher

Derzeit ist es relativ einfach, Zugang zu einem 3D-Drucker zu erhalten, obwohl es normalerweise eine Warteschlange von Kunden gibt, die auf die Nutzung der Geräte warten. Die Wartezeit hängt von der Marke und dem Modell des Druckers, der Institution, bei der er untergebracht ist, und der Art der Nutzung des 3D-Druckers ab.

9. Kann umweltfreundlicher sein als herkömmliche Herstellungsmethoden

Auch dies hängt von der Art des verwendeten Materials, der Intensität der Nutzung und der Wartung der Geräte ab. Weggeworfene Gegenstände, Abwasser und die Emission kleiner Partikel können jedoch ein Problem darstellen (siehe unten).

10. Spezielle Anwendungen des 3D-Drucks in der reparativen und regenerativen Medizin (3D-Bioprinting)



2019-1-BG01-KA203-062371

Erhebliche Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen werden derzeit in die Entwicklung einer neuen Generation von implantierbaren Materialien investiert. Anstatt einfach nur inerte Unterstützung, reibungsfreundliche Oberflächen und Überbrückung zwischen intakten Teilen des beschädigten Gewebes zu bieten (was die Hauptfunktionen der meisten implantierbaren Materialien von heute sind), können die neuen Materialien vermutlich auch ein Teil des natürlichen Lebensraums der Zellen des beschädigten Gewebes werden. Solche Materialien können rein künstlichen Ursprungs sein, aber biologischem Gewebe ähneln (biomimicking materials). Eine mögliche Anwendung des 3D-Bioprinting ist die Bereitstellung einer optimalen 3D-Umgebung der implantierbaren Materialien für die Besiedlung mit lebenden Zellen aus dem umgebenden Gewebe. Eine weitere vielversprechende Anwendung des 3D-Bioprinting ist das Potenzial zur Schaffung von lebendem Gewebe (und möglicherweise funktionierenden Ersatzorganen und verschiedenen "Ersatzteilen" für lebende Körper) unter Verwendung von auf lebenden Zellen basierenden Materialien als druckbare "Biotinte" (siehe unten).

Mögliche Einschränkungen des 3D-Drucks im Vergleich zu traditionellen Fertigungsmethoden können sein:

1. Einschränkungen durch Fehler in der Konstruktion

Während es praktisch keine Grenzen für mögliche Designtypen gibt, kann ein einziger Fehler im Design zur Herstellung unbrauchbarer Objekte führen. Während einige Fehler im Design durch Nachbearbeitung minimiert werden können, kann dies die Zeit zur Bearbeitung eines Auftrags erhöhen und die Haltbarkeit des Objekts verringern.

2. Begrenzung durch das Material

Die meisten 3D-Drucker verwenden als Tinte eine Art Kunststoffpolymer, obwohl einige auch mit Metall und Metalllegierungen drucken können. Objekte, die produziert und dann weggeworfen werden, können ein Problem darstellen, wenn das Material nicht biologisch abbaubar und/oder recycelbar ist. Der Druck und die Nachbearbeitung können zur Emission von Partikeln führen, die zur Umweltverschmutzung beitragen und beim Einatmen und Verschlucken ein krebserregendes Potenzial haben können.

Die Probleme mit dem Material für das Bioprinting können sich beim 3D-Bioprinting noch verschärfen, da die Lebensfähigkeit der lebenden Zellen und die Biokompatibilität von größter Bedeutung sind.

3. Begrenzungen durch die Größe des Objekts

Sehr große Objekte lassen sich möglicherweise nur schwer in einem Stück herstellen. Verschiedene Teile des Objekts müssen möglicherweise separat gedruckt und dann zusammengesetzt werden. Dies kann die Zeit und die Kosten für die Herstellung erhöhen und die Haltbarkeit des Objekts verringern (siehe unten).

4. Die Integrität der produzierten Objekte kann beeinträchtigt werden

Dies kann vor allem dann ein Problem sein, wenn Teile separat hergestellt und dann zusammengefügt werden. Unter physischer Belastung können sich die Schichten lösen (insbesondere bei FDM-produzierten Objekten) und komplexe Objekte können spröde und empfindlich in der Handhabung sein.



5. 3D-gedruckte Objekte müssen möglicherweise nachbearbeitet werden

Im Wesentlichen macht dies keinen Unterschied zur traditionellen Fertigung. Auch hier kann dies die Zeit und die Kosten für die Fertigung erhöhen.

6. Kosten werden bei größeren Chargen im Allgemeinen nicht reduziert

In der traditionellen Fertigung sind die Herstellungskosten pro Objekt oder pro Charge in der Regel geringer, wenn die Anlagen voll ausgelastet sind. Dies ist beim 3D-Druck nicht der Fall, und die Herstellung großer Mengen kann kostspielig sein.

7. Copyright-Fragen

Das ist selbsterklärend. Es geht nicht nur um die gefertigten Objekte, sondern auch um die Software, die Hardware und die Prozesse, die zu deren Herstellung verwendet werden.

8. Ethische Fragen, die hauptsächlich das 3D-Bioprinting von lebendem Gewebe betreffen

9. Kann indirekt zum Abbau von Arbeitsplätzen im traditionellen Fertigungssektor führen

Grundlagen der 3D-Druckverfahren und Materialien

ARTEN VON 3D-DRUCKVERFAHREN

Derzeit gibt es viele Arten von 3D-Drucktechnologien. Allen gemeinsam ist, dass greifbare Objekte durch Ablagerung aufeinanderfolgender Schichten erzeugt werden, anstatt das Objekt aus einem massiven Block auszuschneiden und/oder zu bohren, zu fräsen oder zu bohren. Jede aufeinanderfolgende Schicht stellt einen Querschnitt des zu konstruierenden Objekts dar. Der Prozess wird von einem Computer gesteuert, der mit entsprechender Software für die Erstellung von Konstruktionsdateien, die Dateibearbeitung und den Druck von Objekten ausgestattet ist (siehe weiter unten für Details).

Einige der gängigsten Technologien für den 3D-Druck werden im Folgenden kurz vorgestellt. Diese Liste ist keineswegs exklusiv.

- Flüssige oder halbfeste tintenbasierte Technologien: SLA, FDM, EXT, PolyJet

Alle drei basieren auf der Abscheidung von Schichten flüssiger (mehr oder weniger zähflüssiger) Tinte, die dann durch Wärme oder gerichteten Lichtstrahl (emittiert von einer UV-Lampe oder einem Laser) miteinander verschmolzen werden. Die Tinte kann aus einer Düse extrudiert oder, wenn sie von höherer Konsistenz ist, von einer Spule zugeführt werden.

- Stereolithographie (SLA)

Der stereolithografische 3D-Druck ist vielleicht die am leichtesten verständliche aller 3D-Drucktechnologien, wahrscheinlich weil die Photopolymerisation in der modernen Zahnmedizin häufig verwendet wird. Grundsätzlich handelt es sich bei der Stereolithografie um die Lichthärtung von lichtempfindlichem Material, das schichtweise auf eine bewegliche Plattform extrudiert wird. Die Wellenlänge der Lichtquelle liegt meist im UV-Bereich, es können aber auch andere Wellenlängen verwendet werden. SLA-Materialien polymerisieren über freie radikalische Polymerisation.

Bei der Herstellung des Objekts müssen möglicherweise verschiedene Teile des Objekts gestützt werden, um ein Zusammenfallen der gesamten Struktur zu vermeiden. Aufeinanderfolgende Schichten werden durch Kreuzpolymerisation der gerade polymerisierten Schicht mit der neu aufgetragenen Schicht, bei der die Polymerisation noch nicht abgeschlossen ist, aneinander haftend gemacht. Da die Polymerisation einige Zeit in Anspruch nehmen kann, braucht das gedruckte Objekt in der Regel einige Zeit, um auszuhärten, dann werden Stützen entfernt (falls nach dem Auftragen der letzten Schicht noch welche übrig sind), dann kann eine abschließende Nachbearbeitung erfolgen.

Ein SLA-gedrucktes 3D-Modell ist in Abb. 3 dargestellt.



Abbildung 3. Stereolithographie des knöchernen Labyrinths des Innenohrs beim Menschen. Quelle: Didier Descouens, CC BY-SA 4.0

<<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>>, via Wikimedia Commons

Die beim SLA-basierten Druck verwendete Tinte ist in der Regel flüssig in ihrer unpolymersierten Form. Sie ist meist auf Epoxid- oder Acrylbasis, obwohl auch Tinten auf Basis von Trimethylencarbonat, Polycaprolacton und Polylactid verwendet werden können. Die Verwendung solcher Materialien führt zu gedruckten Objekten mit erheblicher Steifigkeit, die jedoch recht zerbrechlich sind. Daher eignet sich SLA sehr gut für Rapid Prototyping und Forschungszwecke (z. B. Tissue Engineering Scaffolds), aber nicht für Objekte, die dauerhaft sein müssen. SLA hat eine recht hohe Auflösung (die minimale Schichtdicke beträgt 50 µm) und ist daher sehr zuverlässig, wenn feine Details von entscheidender Bedeutung sind.

Mit SLA erstellte Objekte können lichtempfindlich sein und dazu neigen, sich mit der Zeit aufzulösen, insbesondere wenn sie in hellen Umgebungen aufbewahrt werden.

Beim SLA-Druck werden nur selten Lösungsmittel verwendet, daher ist das Risiko des Austretens von Dämpfen in die Atmosphäre gering. Aufgrund der Zerbrechlichkeit von SLA-gedruckten Objekten können weggeworfene Objekte dennoch eine Gefahr für die Umwelt darstellen. Die Verwendung von UV erfordert besondere Vorsichtsmaßnahmen, um eine versehentliche Exposition von Oberflächen, Objekten und Bedienern gegenüber dem aushärtenden Strahl zu vermeiden. Einige der für die Stereolithografie verwendeten Tinten können ein erhebliches neurotoxisches und karzinogenes Potenzial aufweisen. Auch die UV-vermittelte Bildung von Ozon muss möglicherweise berücksichtigt werden.

- Fused Deposition Modeling (FDM), auch bekannt als Fused Filament Fabrication (FFF)

Zurzeit ist dies die am häufigsten verwendete Technologie für den 3D-Druck. Die FDM-Technologie basiert auf der Extrusion eines Filaments aus thermoplastischer Tinte, das von einer Spule durch eine bewegliche, beheizte Druckerdüse geführt wird. Die Tinte in der Düse wird knapp über ihren Schmelzpunkt erhitzt und in halbfester Form extrudiert, die sich fast sofort verfestigt, nachdem eine Schicht aufgetragen wurde. Das Objekt wird auf einer beweglichen Plattform aufgebaut, die sich allmählich absenkt, während die Struktur wächst (Abb. 4).

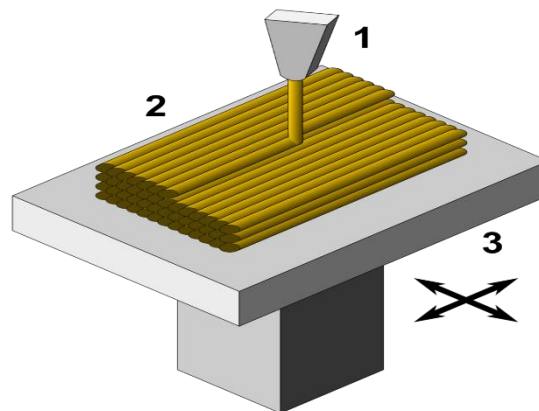


Abbildung 4. Funktionsprinzip von FDM-Druckern. Quelle: Von Gringer - Eigenes Werk, CC0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=73614647>.

Die minimale Schichtdicke für FDM beträgt 100 µm. Die am häufigsten verwendeten Tintenmaterialien für FDM sind Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Polylactid (PLA) und Polyethylenterephthalatglykol (PETG). Andere, wie Polyphenylether (PPE), Polyurethan (PU), Polyethylenterephthalatglykol (PETG), Polyphenylsulfon (PPSP), Polycarbonat (PC), Polyetherimid (PEI), Polyetherketon (PEEK), Polyamid (PA, allgemein bekannt als Nylon) sind ebenfalls im Einsatz. Polyvinylalkohol (PVA) kann ebenfalls verwendet werden, aber da es hydrophil ist, wird PVA am

2019-1-BG01-KA203-062371

häufigsten zur Herstellung von leicht entfernbaren Trägern für eine Struktur verwendet, die mit einer anderen Art von thermoplastischer Tinte gedruckt wurde.

Die beheizbare Tinte für FDM kann auch in Form von Stäbchen oder Granulat vorliegen. Eine Variante des FDM verwendet die Kaltextrusion von unbeheizter Tinte, die üblicherweise als Slurry oder Paste geliefert wird.

Ein FDM-Drucker mit einer Spule Filament ist in Abb. 5 dargestellt.



Abbildung 5. PRUSA i3 MK2 FDM-Drucker (Prusa Research, Prag, Tschechische Republik) mit Spule und einem fertigen Objekt. Bildquelle: Wikimedia Commons, <http://reprap.org/wiki/File:Prusai3-MK2.jpg>.

Da FDM relativ kostengünstig ist, ist es besonders bei Bastlern und Desktop-Modellbauern beliebt. Darüber hinaus wird FDM häufig für das Rapid Prototyping im Maschinenbau, bei der Herstellung von Hochleistungsteilen und -maschinen, im Bildungswesen und in der Kunst eingesetzt.

Die mit FDM hergestellten Objekte sind deutlich haltbarer als die mit SLA hergestellten und mit sehr guter Qualität der Detailwiedergabe. FDM-Tinten unterschiedlicher Qualität ergeben Objekte mit unterschiedlichen Eigenschaften in Bezug auf Haltbarkeit, Steifigkeit und Flexibilität (siehe unten).

Die Nachteile des 3D-Drucks mit FDM beziehen sich hauptsächlich auf potenzielle Umweltgefahren (Verwendung von Lösungsmitteln, Emission kleiner Partikel bei der Nachbearbeitung und die Tatsache, dass die weggeworfenen Objekte recht langlebig sind).

- Semi-solid Extrusion (EXT) 3D-Druck

EXT 3D-Druck ist eine weitere Technologie, die auf Extrusion basiert. Die Tinte ist in der Regel ein Polymer-Lösungsmittel-Gemisch mit der Konsistenz einer Paste. EXT-Materialien sind nicht thermoplastisch und ermöglichen den Druck bei niedrigen Temperaturen. Auch hier wird das Objekt auf einer beweglichen Plattform aufgebaut.

EXT wird häufig in der Forschung (z. B. Gewebegerüste) und für pharmazeutische Zwecke (gezielte und/oder zeitgesteuerte Abgabe von Medikamenten) verwendet. Die biologische Sicherheit wird durch die Verwendung von Tinten auf Basis von Polyvinylpyrrolidon, Polyethylenglykol, Methycelullose, Hydroxypropylmethylcellulose, Polycaprolacton und anderen Materialien gewährleistet. EXT ist einer der potentiellen Ansätze, um lebendes Gewebe aus einem Hydrogel zu pressen, das lebende Zellen enthält. Auch die Extrusion mit zähflüssiger Lebensmittelpaste (Zuckerguss, Schokolade, Gelee usw.) ist eine bevorzugte Methode für den 3D-Druck in der Lebensmittelindustrie (Abb. 6).



Abbildung 6. Extrusionsdruck für die Lebensmittelindustrie. Quelle: Grup de recerca de la Universitat de Columbia - <https://www.creativemachineslab.com/digital-food.html>, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=84202502>



2019-1-BG01-KA203-062371

Da das Material für den EXT-3D-Druck weder lichtempfindlich noch thermoplastisch ist, verfestigen sich die Schichten normalerweise nicht sofort. Daher kann ein neu gedrucktes 3D-Objekt nach der Fertigstellung Zeit benötigen, um sich zu verfestigen und/oder zu trocknen, während das/die Lösungsmittel verdampfen. Außerdem kann es zu Verwerfungen, Schrumpfung und Verformung neigen. Die minimale Schichtdicke für EXT beträgt 800 µm. Diese geringe Auflösung ist den Semi-Solid-Extrusionstechniken inhärent.

- PolyJet

PolyJet ist eine weitere flüssigkeitsbasierte 3D-Drucktechnologie. Wie SLA basiert sie auf der schichtweisen UV-Härtung eines lichtempfindlichen Polymers. Die Tinte wird jedoch in Tröpfchen aus dem Druckkopf freigesetzt, die sich auf einer Bauplattform ansammeln, wie von einer bestimmten Software gesteuert. Die PolyJet-Technologie ermöglicht das Mischen von Tinten, was zu einer größeren Vielfalt an Eigenschaften der hergestellten Objekte führt.

PolyJet-Tinten umfassen eine große Vielfalt an Materialien. Zu den häufig verwendeten gehören ABS (verschiedene Modifikationen), die verwandte Verbindung Acryl-Styrol-Acrylnitril (ASA, hitzebeständiger und UV-beständiger als ABS), Polycarbonat und Polyetherketon-Keton (PEKK). Verschiedene lichtempfindliche Materialien, die in anderen flüssigkeitsbasierten 3D-Drucktechnologien verwendet werden, können auch in Polyjet eingesetzt werden. Es gibt auch die speziell entwickelte Serie der Vero Polyjet™-Tinten, die von einem der Marktführer für 3D-Drucker und Materialien, Stratasys, patentiert wurde. Prominente Vertreter der biokompatiblen PolyJet-Materialien sind MED610 und MED620, ein Harz auf Methacrylatbasis, das in der Medizin und Zahnmedizin für Rapid Prototyping eingesetzt wird.

Vorteile der Verwendung von PolyJet sind die relativ hohe Auflösung (die minimale Schichtdicke beträgt 160 µm, was die Erstellung von stabilen Strukturen mit komplexer Geometrie und exquisiten Details ermöglicht) und die große Vielfalt an Eigenschaften (Festigkeit, Flexibilität, Farben usw.). Die Nachteile sind (neben den oben beschriebenen allgemeinen Nachteilen des 3D-Drucks) die inhärent hohe Emission kleiner Partikel, die Verwendung von UV-Licht und die Emission giftiger Dämpfe beim Aushärten von Objekten, die mit einigen Arten von Tinten (z. B. ASA) hergestellt wurden. Gedruckte Objekte müssen möglicherweise nachbearbeitet werden und können lichtempfindlich sein.

● Puderbasierter (PB) 3D-Druck

Die PB-3D-Drucktechnologie basiert auf der Abscheidung aufeinanderfolgender Schichten aus pulverförmigem Material und deren Bindung mittels einer flüssigen Binderlösung oder dem Verschmelzen mit anderen Methoden (siehe unten). Das Pulver wird in einem Pulverbett aufgetragen oder durch einen Pulverstrahl erzeugt und anschließend mit Binder besprüht oder bespritzt, mit Licht bestrahlt oder erhitzt, um die Integrität des Objekts zu erreichen.

Die minimale Schichtdicke kann beim PB-3D-Druck stark variieren und die Schichten können bei einigen Materialien bis zu 20-30 µm dünn sein. Diese sehr hohe Auflösung ermöglicht es, sehr komplexe Strukturen mit exquisiten Details zu erzeugen. Im Allgemeinen liegt die Schichtdicke jedoch bei etwa 200 µm.

Pulverförmige Materialien werden in der Regel durch kryogene Vermahlung in einer Kugelmühle bei einer Temperatur hergestellt, die unterhalb der Glasübergangstemperatur des Materials liegt. Die Zerkleinerung kann mit Niedrigtemperaturgasen (flüssiges CO₂ oder flüssiger Stickstoff - Trockenmahlung) oder einer Mischung aus Niedrigtemperaturgas und organischen Lösungsmitteln (Nassmahlung) erfolgen. In seiner einfachsten Form ist der PB-3D-Druck mit Materialien wie pulverisierter Stärke oder Gips, die mit Klebstoff gebunden sind, realisierbar (Abb.7). Farbstoffe und Weichmacherverbindungen können der Bindungslösung zugesetzt werden, um die gewünschten Eigenschaften zu erreichen.



Abbildung 7. Durch pulverbasierten 3D-Druck hergestellte schnelle Prototypen. Quelle: S Zillayali, CC BY-SA 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, via Wikimedia Commons

Nachteile des PB-basierten 3D-Drucks beziehen sich zum einen auf die physikalischen Eigenschaften der mit dieser Art von Technologie erstellten Objekte und zum anderen auf die Notwendigkeit der Nachbearbeitung, um eine maximale Qualität zu erreichen. Objekte, die mit PB 3D gebaut werden, sind von Natur aus sehr porös und weisen daher eine schlechte mechanische Beständigkeit auf und können zerbrechlich sein.

PB-gedruckte Objekte benötigen immer Zeit für die Verdunstung der Lösungsmittel. Eine Nachbearbeitung ist in der Regel erforderlich, um überschüssiges Pulver zu entfernen (daher wird immer eine gewisse Menge an Material verschwendet) und um die Eigenschaften der hergestellten Objekte zu verbessern (Festigkeit, Farbe, Politur usw.). Die Emission von potenziell schädlichen kleinen Partikeln ist bei allen PB-basierten Technologien für den 3D-Druck ein ernstes Problem.

PB wird in der Forschung, Zahnmedizin und Medizin erfolgreich zur Herstellung von Implantaten und zur Herstellung von Arzneimitteln mit spezifischen pharmakokinetischen Eigenschaften wie schnell zerfallende Tabletten, Arzneimittel mit verzögerter, pulsierender oder



verlängerter Freisetzung eingesetzt. Die biologische Sicherheit dieser Darreichungsformen wird durch die Verwendung von Methacrylat oder Ethylcellulose als Träger der bioaktiven Substanz gewährleistet.

- ColorJet

ColorJet ist nicht wirklich eine Technologie, sondern eine Marke für pulverbasierte 3D-Drucker und Zubehör, die in Indien hergestellt wird. Sie bietet eine der einfachsten Lösungen im PB-3D-Druck. Das verwendete Material ist meist weißes Gipspulver, obwohl auch Kunststoff verwendet werden kann (z. B. das firmeneigene, patentierte Visijet C4 Spectrum Pulver). Das Material wird auf eine bewegliche Plattform geschichtet und mit Klebstoff gebunden. Das Bindemittel kann verschiedene Farbstoffe enthalten, die dem zu bauenden Modell unterschiedliche Farben verleihen.

ColorJet wird am häufigsten für das Rapid Prototyping verwendet. Die minimale Schichtdicke beträgt etwa 100 µm, kann aber bei verschiedenen Materialien variieren.

ColorJet bietet eine preisgünstige Lösung, bei der Haltbarkeit, Sprödigkeit und Porosität nicht von großer Bedeutung sind. Daher ist es eine akzeptable Lösung für die Herstellung von Modellen für Ausbildung, Forschung und kommerzielle Zwecke (z. B. Verkaufsmodelle) und in der Kunst. Ein ähnlicher Prozess unter Verwendung von essbarem Pulver und einer Bindemittellösung wird in der Lebensmittelindustrie üblicherweise zur Herstellung von kundenspezifischen Süßigkeiten und Gerichten verwendet.

Mit ColorJet gedruckte Objekte benötigen unter Umständen eine umfangreiche Nachbearbeitung. Gipsstrukturen müssen nach ihrer Fertigstellung aushärten und die Lösungsmittel müssen verdampfen. Anschließend wird das Objekt poliert und mit einer anderen Art von Bindemittel (in der Regel Acryl) imprägniert, um maximale Festigkeit zu erreichen und die Oberflächenporosität zu verringern. Lösungsmitteldämpfe können ein Umweltproblem darstellen, ebenso wie die Emission kleiner Partikel.

- Selektives Laser-Sintern (SLS)

SLS weist die oben aufgeführten gemeinsamen Merkmale für den PB-3D-Druck auf. Beim SLS wird das pulverförmige Material geschichtet und ein gerichteter Lichtstrahl, der vom Druckkopf erzeugt wird, verflüssigt die Schichten teilweise und verschmilzt sie miteinander, während die Struktur aufgebaut wird, was allgemein als Einschnürung bezeichnet wird (Abb. 8).

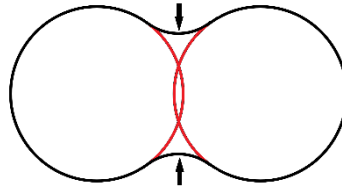


Abbildung 8. Bildung eines "Halses" zwischen zwei verschmelzenden Schichten (Pfeile).

**Quelle: Mendoza.755 - Eigenes Werk, CC BY-SA 4.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=76830144>**

Die minimale Schichtdicke beim SLS beträgt etwa 100 µm.

SLS funktioniert sehr gut mit Materialien mit hohem Schmelzpunkt und wird daher am häufigsten mit Tinten auf Metallbasis verwendet. Es können auch Kunststoffe (Polyamid, Polycarbonat, Polystyrol und andere), thermoplastische Harze, Glas- und Keramikpulver verwendet werden. SLS wird häufig für das Rapid Prototyping in der Forschung (insbesondere für Gewebegerüste) und in der Zahnmedizin eingesetzt. Bislang sind die Entwicklungsmöglichkeiten der SLS-basierten Technologie in der pharmazeutischen Industrie recht begrenzt, da die Strahlungsenergie und die Hitze, die bei der Schichtfusion entstehen, die Eigenschaften der bioaktiven Substanz ernsthaft beeinträchtigen können.

In der Lebensmittelindustrie können pulverförmige Lebensmittel (Kakao, Zucker, etc.) für den 3D-Druck verwendet werden.

- Selektives Laserschmelzen (SLM)

SLM wird oft als eine Ableitung von SLS angesehen, da es hauptsächlich zum Drucken mit Metall- und Metalllegierungspulvern verwendet wird. Doch während der SLS-Druckkopf-Laser gerade genug Energie erzeugt, um die Schichten miteinander zu verschmelzen, verwendet SLM einen Hochleistungslaser, der einen Metallblock komplett schmelzen kann und dann ähnlich wie beim Gießen in die gewünschte Form bringen lässt. SLM erzeugt Objekte, die deutlich weniger porös sind als SLS und aufgrund der homogenen inneren Struktur eine bessere mechanische Belastbarkeit aufweisen. Ein Nachteil von SLM ist, dass die Objekte nach ihrer Fertigstellung poliert werden müssen, da es Strukturen mit erhöhter Oberflächenkörnung erzeugt.

Das Elektronenstrahlschmelzen (EBM) ist eine Unterart des SLM, bei der in ähnlicher Weise ein elektronischer Strahl zum Schmelzen von Metallpulvern verwendet wird.

- Selektives Wärmesintern (SHS)

SHS basiert im Wesentlichen auf dem gleichen Prinzip wie SLS, aber die Tinte ist thermoplastisch bzw. die schichtweise Verschmelzung wird durch die von einem Thermodruckkopf erzeugte Wärme erreicht. Das am häufigsten verwendete Material bei SHS ist Kunststoff (speziell Polyamid, aber auch andere Polymere können verwendet werden).



2019-1-BG01-KA203-062371

Alle mit SLS oder SHS hergestellten Objekte sind anfällig für Verzug und Schrumpfung. Die mechanischen Eigenschaften der gedruckten Objekte können sowohl von Objekt zu Objekt als auch von Charge zu Charge inkonsistent sein. SLS- und SHS-gefertigte Objekte erfordern häufig eine Nachbearbeitung, wie z. B. das Entfernen von Trägern und die Beschichtung mit Versiegelungsmitteln, um die Oberflächenporosität zu verringern.

- Mehrstrahlfusion (MJF)

Der MJF-3D-Druck ist eine Mischform aus dem ColorJet-Verfahren (Verwendung von chemischen Bindemitteln) und dem SHS-Verfahren (Verwendung von Wärme), die hauptsächlich mit Polyamid (Nylon) arbeitet. Grundsätzlich wird feinkörniges Polyamid-Pulver auf ein Pulverbett geschichtet, mit Bindemittel besprüht oder gespritzt und dann selektiv nach Anweisung einer vorprogrammierten Software erhitzt. Die minimale Schichtdicke beträgt etwa 80 µm. Nach Fertigstellung des Objekts erfolgt die Nachbearbeitung (Entfernen von überschüssigem Pulver, Polieren, etc.). MJF produziert Objekte, die weniger porös und daher gleichmäßiger in ihren mechanischen Eigenschaften sind als SLS oder SHS und hat eine bessere Kapazität für die Reproduktion von feinen Details. Auch die Oberflächengüte ist mit MJF besser. Chemische Dämpfe und die Erzeugung kleiner Partikel sind ein Problem, wie bei allen PB-3D-Technologien.

NACHBEARBEITUNGSANFORDERUNGEN FÜR VERSCHIEDENE 3D-DRUCKTECHNOLOGIEN

Nicht alle durch 3D-Druck hergestellten Objekte müssen nachbearbeitet werden. Dennoch müssen viele nach Fertigstellung der Struktur nachbearbeitet werden. Ob ein Objekt nachbearbeitet werden muss, hängt vom Material, der Technologie, den gewünschten ästhetischen oder mechanischen Eigenschaften und anderen Faktoren ab.

Generell gibt es mehrere Arten der Nachbearbeitung von 3D-gedruckten Objekten:

- Abbinden und/oder Aushärten

Fast alle 3D-gedruckten Strukturen benötigen nach ihrer Fertigstellung eine gewisse Zeit, um zu reifen und optimale mechanische Eigenschaften zu erreichen. Objekte, die durch extrusionsbasierte Verfahren (insbesondere solche, die halb feste Mischungen aus Polymer und Lösungsmittel verwenden) und pulverbasierte Verfahren mit Materialien, die mit Binderlösungen imprägniert wurden, hergestellt wurden, sind unmittelbar nach der Fertigstellung besonders empfindlich gegenüber mechanischer Belastung. In diesem Fall umfasst die Nachbearbeitung die Zeit für die Verdunstung des Lösungsmittels und die Aushärtung. In einigen Fällen (aber nicht immer) kann dies durch eine Erhöhung der Belüftung in den Räumen, in denen die fertigen Objekte aufbewahrt werden, erleichtert werden.

- Abstützung von unfertigen Strukturen

Komplexe Strukturen, die Überhänge enthalten, sind während der Herstellung möglicherweise ohne Stützen, wenn auch nur vorübergehend, nicht stabil. Diese Stützen müssen nach Fertigstellung der Struktur entfernt werden, was die Zeit bis zur Fertigstellung und die Produktionskosten erhöht



2019-1-BG01-KA203-062371

(insbesondere, wenn dies mit manueller Arbeit verbunden ist). Beim SLA-basierten 3D-Druck werden Stützen für eine mit thermoplastischer Tinte gedruckte Struktur meist aus Polyvinylalkohol hergestellt. Da er löslich ist, können solche Stützen bei der Nachbearbeitung mit einem Wasserstrahl leicht entfernt werden. Letzteres erfordert jedoch Rohrleitungen, einen Zugang zu Wasser und ein Dekontaminationssystem für das Abwasser (was die Kosten ebenfalls erhöhen kann). Temporäre Stützstrukturen in SLS und SHS bestehen in der Regel aus ungesintertem Material, das abgesaugt oder weggeblasen werden kann.

- Entfernen von überschüssigem Material

Dies ist entscheidend für Objekte, die mit den meisten pulverbasierten Methoden hergestellt werden. Überschüssiges Pulver muss mit Hilfe von Vakuum, Druckluft oder einem Wasserstrahl entfernt werden (auch hier ergeben sich Bedenken hinsichtlich der Wasserversorgung und der Dekontaminierung des Abwassers).

- Polieren

Polieren ist ein Muss für die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von mechanischen Teilen (insbesondere solchen, die Bewegung und Reibung ausgesetzt sind) und Objekten mit erhöhter Körnigkeit der Oberfläche (wie solche, die durch selektives Laserschmelzen hergestellt werden). Objekte mit ästhetischen Eigenschaften müssen möglicherweise ebenfalls poliert werden.

- Versiegelung von Oberflächenporen

Dies ist ein wichtiger Nachbearbeitungsschritt für Technologien, die Objekte mit erhöhter Porosität ergeben, wie SLS oder SHS. Oberflächenporen können mit undurchlässigen Beschichtungen wie Cyanacrylatbeschichtungen oder durch heißisostatisches Pressen versiegelt werden.

- Malen

Dies ist in der Regel nicht erforderlich, da die meisten 3D-Druckverfahren andersfarbige Materialien oder andersfarbige Bindemittel verwenden.

WELCHES VERFAHREN FÜR WAS? GRUNDLEGENDE ÜBERLEGUNGEN BEI DER AUSWAHL DER FÜR EINE BESTIMMTE ANWENDUNG GEEIGNETEN 3D-DRUCKTECHNOLOGIE

Obwohl alle 3D-Drucktechnologien sich überschneidende Anwendungen haben können (z. B. Rapid Prototyping), gibt es Faktoren, die bei der Auswahl einer 3D-Drucktechnologie für ein bestimmtes Projekt oder eine spezifische industrielle Lösung eine Rolle spielen können. Die wichtigsten Überlegungen sind:

- Art des Materials, das zum Drucken eines Objekts verwendet werden kann. Viele der auf dem Markt befindlichen 3D-Drucker können eine Vielzahl unterschiedlicher Materialien verwenden. Architektur-, Verkaufs- und Ausstellungsmodelle sowie Modelle für Ausbildungszwecke können bequem mit ColorJet-, SLA- und FDM-Technologien erstellt werden, die Gips oder verschiedene Arten von Kunststoffen verwenden. Kleine Desktop-Maschinen, die Hobbyisten und Künstlern dienen,



2019-1-BG01-KA203-062371

basieren meist auf der FDM-Technologie. SLS/SLM und SHS werden in der Regel eingesetzt, wenn die Objekte aus Metall und metallischen Legierungen hergestellt werden müssen.

- Verfügbarkeit der 3D-Druckmaschine. Normalerweise werden Bestellungen für eine bestimmte Maschine in eine Warteschlange gestellt und arbeiten nach dem Prinzip "Wer zuerst kommt, mahlt zuerst". In Regionen, in denen 3D-Drucker kaum verfügbar sind, kann dieser Faktor von größter Bedeutung sein und Vorrang vor der Art des Materials haben.

- Verfügbarkeit des Materials. Kunststoff ist vielseitig einsetzbar, verfügbar und, mit Ausnahme von Hochleistungspolymeren, relativ günstig, während Metall unter Umständen teurer ist.

- Kosten für die Produktion pro Objekt. Diese hängen mit der für die Erstellung von Objekten verwendeten Technologie, dem verwendeten Material und den Anforderungen an die Nachbearbeitung zusammen. Es wurde bereits erwähnt, dass im Gegensatz zum Gießen eine Vergrößerung beim 3D-Druck nicht immer den Stückpreis senkt. Der Preis pro Objekt beinhaltet nicht nur die Kosten für die Herstellung, sondern auch die Kosten für die Nachbearbeitung (falls diese erforderlich ist) sowie die Kosten, die durch Maßnahmen zur Verringerung der Umweltbelastung entstehen. Unter den gängigen PB-Technologien ist SHS eine budgetorientiertere Lösung als SLS, da Anschaffung und Wartung eines Thermodruckkopfes in der Regel kostengünstiger sind als die eines Laserdruckkopfes. Objekte, die mit SHS hergestellt werden, sind daher in der Regel günstiger als solche, die mit SLS hergestellt werden, und der Prozess kann für kleine Aufträge leicht verkleinert werden.

- Schnelligkeit der Herstellung, einschließlich der Nachbearbeitung und der Zeit für die Warteschlangenbildung von Aufträgen. Kleine Objekte können in wenigen Minuten bis Stunden gedruckt werden. Die Zeit für den Druck steigt mit der Größe der Objekte bis zu einem ganzen Tag und schließlich bei sehr großen Objekten bis zu mehreren Tagen, obwohl letzteres selten ist. Auch die Nachbearbeitungszeiten können ein Problem darstellen. Bei Extrusionstechnologien ist in der Regel keine Nachbearbeitung erforderlich, aber das Objekt braucht möglicherweise Zeit zum Aushärten. Mit ColorJet hergestellte Objekte benötigen Zeit zum Trocknen und Aushärten. Pulverbasierte Technologien benötigen fast ausnahmslos Zeit für die Nachbearbeitung, was sowohl die Kosten als auch die Zeit für die Herstellung erhöht,

- Eigenschaften des Endprodukts (mechanische Eigenschaften, ästhetischer Wert)

Kunststoff-3D-Druckfarbe kann es in vielen verschiedenen Varianten mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften geben. Je nach Verwendungszweck des Objekts werden Kunststoff (leicht und gleichzeitig haltbar, leicht einfärbbar, leicht polierbar, thermo- und fotohärtbar) oder Metall (belastbar, UV- und hitzebeständig, Einfärben und Polieren erfordern möglicherweise spezielle Geräte und Verfahren) bevorzugt.

Unter der Fülle der Kunststoffsorten stehen verschiedene Polymere mit unterschiedlicher mechanischer Belastbarkeit zur Verfügung. Generell ermöglicht der SLA-Druck fein polierte Strukturen mit exquisiten Details, die jedoch recht spröde sind. Er ist daher ungeeignet für Anwendungen, bei denen es auf Haltbarkeit ankommt. Mit FDM lassen sich deutlich haltbarere Objekte herstellen als mit SLA, wobei es je nach verwendetem Material unterschiedliche Grade der mechanischen Belastbarkeit gibt. Im Allgemeinen sind PVA, ABS und PLA "Commodity"-Farben für FDM. Diese sind relativ günstig, aber die resultierenden Objekte sind anfällig für Verformungen. Mit PLA gedruckte Objekte sind außerdem recht spröde. ABS-gedruckte Objekte sind lichtempfindlich. Die Verwendung von Polyurethan ergibt



2019-1-BG01-KA203-062371

Teile mit einem erheblichen Maß an Flexibilität. Die nächste Stufe in der FDM-Qualität sind PC, PETG und PPE. Diese Materialien werden hauptsächlich als Konstruktionswerkstoffe für die Herstellung von mechanischen Teilen und Werkzeugen verwendet. PETG ist außerdem lebensmittelecht. Hochbeständige FDM-Tinten sind PEI und PEEK, die für Teile und Geräte verwendet werden, die eine sehr hohe Beständigkeit aufweisen müssen, wie z. B. bewegliche und/oder belastete Teile und wenn die thermische Stabilität entscheidend ist. Alle 3D-gedruckten Objekte können unter Belastung zur Delamination neigen, aber PEEK-gedruckte Objekte weisen eine hervorragende Schicht-zu-Schicht-Haftung auf und sind daher sehr haltbar. Es ist jedoch recht teuer, und da der Schmelzpunkt höher ist als bei den anderen FDM-Tinten, muss der Drucker über die Möglichkeit verfügen, die Düse auf hohe Temperaturen zu erhitzen.

3D-gedruckte Arzneimitteldarreichungsformen und Gewebegerüste haben spezifische Anforderungen, die im Allgemeinen durch Extrusionsverfahren (insbesondere halb feste Extrusion wie EXT) und einige der pulverbasierten Technologien erfüllt werden (jedoch nicht durch solche, die große Mengen an Strahlungs- oder Infrarotenergie benötigen, wie SLS und SHS). Da die minimale Schichtdicke bei EXT fast 1 mm beträgt, sind die gedruckten Strukturen gröber und weniger detailliert.

Pulverbasierte Verfahren haben ein sehr hohes Auflösungsvermögen und ermöglichen daher eine bessere Wiedergabe von feinen Details. Dies gilt vor allem für SLS (das allerdings hauptsächlich mit metallischen Pulvern arbeitet), aber auch MJF (arbeitet gut mit Kunststoff) schneidet in puncto Auflösung gut ab.

Die mit den meisten PB-Technologien hergestellten Strukturen sind auch haltbar (mit Ausnahme von ColorJet-gedruckten Gipsobjekten), aber die Porosität kann ihre mechanischen Eigenschaften beeinträchtigen. Wenn Letzteres ein ernsthaftes Problem ist, kann SLM eine Lösung sein, vorausgesetzt, es wird eine angemessene Nachbearbeitung durchgeführt.

- Umweltbelange (im Zusammenhang mit der Herstellung oder Nachbearbeitung oder der biologischen Abbaubarkeit von ausrangierten Gegenständen).

Extrusionsbasierte und einige der PB-Technologien erzeugen Lösungsmitteldämpfe. Pulverbasierte Technologien erzeugen große Mengen an kleinen Partikeln. Alle diese haben erhebliche potenzielle schädliche Auswirkungen und müssen herausgefiltert und/oder dekontaminiert werden.

HÄUFIG VERWENDETE SOFTWARE FÜR DEN 3D-DRUCK

Der 3D-Druck nutzt zuvor gesammelte Daten, die auf einem digitalen Informationsträger gespeichert wurden. Im Verlauf des 3D-Drucks eines komplexen Objekts werden die momentanen Änderungen im Muster der Ablagerung der laufenden Schicht durch die Informationen bestimmter Querschnitte in der digitalen Datei diktiert, die darstellen, wie genau die Struktur an diesem bestimmten Punkt aussehen muss. So können Strukturen mit einfachen Mustern durch weniger Querschnitte dargestellt werden, während digitale Dateien für Strukturen mit komplizierten Mustern mehr Querschnitte enthalten sollten, die angeben, wo und wie die Struktur verändert wird. Jeder Querschnitt stellt ein geschlossenes Polygon dar und entspricht einer anderen Position entlang der z-Achse.



Querschnitte dürfen sich nicht überschneiden oder überlagern und müssen bestenfalls ohne Zwischenräume sein. Kleine Unstimmigkeiten können von der Software ohne wesentliche Form- und Strukturänderungen ausgeglichen werden.

Für den 3D-Druck werden am häufigsten CAD-Bilder (Computer-Assisted Design) verwendet. Dabei kann es sich um die konventionellen 2D-DWG-Bilder handeln, die von AutoCAD generiert werden, obwohl diese mit entsprechender Software, z. B. Sketchup Pro, in 3D konvertiert werden müssen. Das Stereolithografie-Dateiformat (Standard Tessellation Language, STL) war das erste, das speziell für die additive Fertigung bestimmt war. Es wurde in den 1980er Jahren von 3D Systems, einem von Charles Hull, dem Erfinder von SLA, gegründeten Unternehmen, entwickelt und für die Verwendung angepasst. Abgesehen von AutoCAD sind gängige CAD-Software, die Daten in das STL-Format exportieren oder konvertieren kann, Alibre, Mechanical Desktop, I-DEAS, SolidDesigner, ProE und andere. Online-Konverter sind ebenfalls leicht verfügbar, wie z. B. AnyConv (<https://anyconv.com/stl-converter/>).

Bilder, die mit einem 3D-Scanner oder durch Photogrammetrie eines typischen 2D-Digitalbildes (aufgenommen mit einer Digitalkamera) erzeugt wurden, können ebenfalls für die additive Fertigung ausreichen. Je nachdem, woher die Daten für das Objekt stammen, kann das Endergebnis mehr oder weniger getreu dem Ausgangsbild sein. CAD-Bilder führen in der Regel zu Objekten mit deutlich weniger Fehlern als andere Arten von digitalen Daten. Diese Fehler können später korrigiert werden. Es gibt viele verschiedene Marken von Software für die Photogrammetrie, hauptsächlich Microsoft Windows-basiert (Zephyr3D, PhotoModeler, PhotoSynth und andere), aber es gibt auch einige, die andere Betriebssysteme wie Linux und MacOS verwenden (z. B. Pix4D Mapper, Metashape, OpenDroneMap und andere). Eine detaillierte Liste häufig verwendeter Photogrammetrie-Software mit ihren grundlegenden Eigenschaften kann hier eingesehen werden:

https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_photogrammetry_software

Es gibt auch Online-Tools für die Photogrammetrie, wie z.B. das oben erwähnte AnyConv (<https://anyconv.com/stl-converter/>).

Gestaltungsrichtlinien für den 3D-Druck

Um ein Objekt zu drucken, muss es, wenn keine STL-Datei vorhanden ist, von einer Software wie AutoCAD oder anderen ausgegeben werden (siehe oben). Die meiste professionelle 3D-Modellierungssoftware ist proprietär, aber es gibt auch freie Software, hauptsächlich für Ausbildungszwecke für Anfänger auf dem Gebiet und für Hobbyisten (FreeCAD, 3D Slash, TinkerCAD, Vectary, SketchUp, Leopoldy, Sculpttris, Rhinoceros und andere). Dann wird die resultierende STL-Datei von einer anderen "Slicer"-Software wie Repetier, OctoPrint, Z-Suite, Tinkering Suite, Cura, PrusaSlicer, Simplify3D und anderen verwendet, um eine Datei mit einer Reihe von dünnen Schichten zu erzeugen. Die resultierende Datei wird vom Host des 3D-Druckers verwendet, um ein 3D-Objekt zu

erzeugen. Manche Slicer-Software fungiert auch als Drucker-Host, wie z. B. Cura, 3DPrinterOS, OctoPrint, MatterControl und andere. Während die meiste professionelle 3D-Modellierungssoftware in der Regel eigenständig ist, kann freie Software als Plugin verfügbar sein und ist viel wahrscheinlicher für andere Betriebssysteme als Windows verfügbar.

STL-Dateien enthalten rohe Netzdaten, die auf Triangulationen der Oberfläche von CAD-Modellen basieren. So wird die Oberfläche jeder Facette des Objekts durch ein Polygonnetz dargestellt, das einer Reihe von Regeln entsprechen muss. Die grundlegenden Regeln sind vier, nämlich:

- Die Regel "Scheitelpunkt zu Scheitelpunkt" - jedes Dreieck muss 2 Scheitelpunkte mit seinen Nachbardreiecken teilen;
- Die "Rechtsregel" - die Eckpunkte müssen gegen den Uhrzeigersinn aufgelistet werden;
- Die Regel 'nach außen zeigend' - die Richtung des Normalenvektors sollte nach außen zeigen;
- Die "Alles-Positiv-Regel" - alle Koordinaten der Dreiecksecken müssen durch positive Zahlen dargestellt werden.

Ein Beispiel ist in Abb. 9 zu sehen.

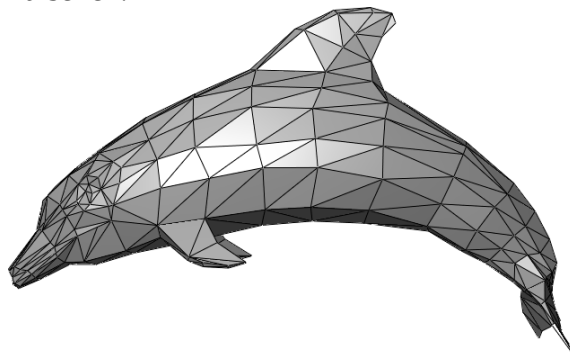


Abbildung 9. Ein Polygonnetz, das ein 3D-Bild eines Delphins darstellt. Quelle: Chrschn, Public domain, via Wikimedia Commons

STL-Dateien können Informationen in binärer Kodierung oder in ASCII-Kodierung speichern. Dateien im Binärformat sind in der Regel kleiner und können leicht weitergegeben werden, während ASCII-Dateien zum manuellen Lesen und Überprüfen der STL-Datei verwendet werden, z. B. beim Testen neuer CAD-Schnittstellen.

Komplexe Objekte können eine Herausforderung für STL-Dateien sein, da es zu viele Oberflächen gibt, die in den Berechnungen berücksichtigt werden müssen. Außerdem hatten die frühen STL-Dateien nur sehr begrenzte Eigenschaften zur Darstellung von Farbe, Textur, Material und interner Struktur (obwohl dies später behoben wurde). Einige Softwaretypen, wie z. B. das prototypische AutoCAD, können nur Konstruktionen von Volumenobjekten in STL exportieren. Nicht zusammenhängende Flächen (z. B. mit Lücken oder Überlappungen) sind in STL-Dateien nur schwer zu verarbeiten oder anzupassen und würden nicht gedruckt werden. Daher wurde 2006 eine verbesserte Version des STL-Formats veröffentlicht, die schließlich in ein anderes, vielseitigeres CAD-Dateiformat, das Additive Manufacturing File Format (AMF), überführt wurde. Nichtsdestotrotz verwenden viele 3D-

Drucker, die heute eingesetzt werden, insbesondere solche, die im kleinen Maßstab arbeiten, STL-Dateien.

AMF-Dateien können die interne Struktur leicht darstellen, indem sie ein Flächen/Vertex-Polygon-Layout und gekrümmte Dreiecke verwenden, um eine diskrete Volumeneinheit des Materials zu definieren. Für ein einzelnes Objekt können mehrere Volumina angegeben werden. AMF-Dateien enthalten auch Informationen über das Material, die Farbe und Textur des gedruckten Objekts oder seiner Teile sowie die Reihenfolge des Drucks.

Jonathan Hiller, einer der Erfinder des AMF-Dateiformats, betreibt eine detaillierte und benutzerfreundliche Website, die CAD-Software oder 3D-Modellierung und Anleitungen bietet: <https://sites.google.com/site/jonhiller/software>.

Kostenlose Architektur-CAD-Zeichnungen für AutoCAD und 3D-Modellierungssoftware sind im Internet leicht verfügbar, z. B. <https://www.arc4t.com/>, <https://www.tinkercad.com/>, <https://www.sketchup.com/> und andere. Ein kostenloses 3D-CAD-Bild ist in Abb. 10 dargestellt.

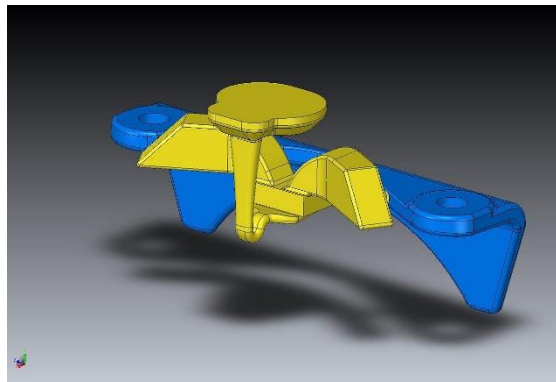


Abbildung 10. Ein 3D-CAD-Modell zur Verwendung im 3D-Druck. Quelle: OKFoundryCompany aus Richmond, USA, CC BY 2.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0>>, via Wikimedia Commons

Kostenlose STL-Dateien, 3D-Drucker-Dateien und 3D-Drucker-Entwürfe stehen unter anderem auf www.thingiverse.com, www.youmagine.com, www.myminifactory.com, <https://library.zortrax.com/>, <https://www.cgtrader.com/>, <https://cults3d.com/en>, <https://www.youmagine.com/> <https://www.turbosquid.com/Search/3D-Models/free/stl> zur Verfügung.

STL-Editor-Software ist für mehrere Quellen wie <https://www.meshlab.net/>, <https://www.blender.org/>, <https://www.freecadweb.org/>, <https://www.3dslash.net/index.php>, <https://www.sketchup.com/> und andere verfügbar.



Verweise

Kodama H. 1981. Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. *Rev Sci Instrum*, 52(11): 1770–73.

Melchels FP, Feijen J, Grijpma DW. 2009. A poly(D,L-lactide) resin for the preparation of tissue engineering scaffolds by stereolithography. *Biomaterials*, 30(23-24):3801-9.

Shelby A. Skoog, Peter L. Goering, Roger J. Narayan. 2014. Stereolithography in tissue engineering. *J Mater Sci Mater Med*, 25: 845–56.

Alhnan A, Okwuosa M, Chijioke T, et al. 2016. Emergence of 3D Printed Dosage Forms: Opportunities and Challenges. *Pharm Res*, 33 (8): 1817-32.

Goyanes A, Buanz AB, Basit AW, et al. 2014. Fused-filament 3D printing (3DP) for fabrication of tablets. *Int J Pharm*. 2014;476(1–2):88–92.

Wang J, Shaw LL, Cameron TB. 2006. Solid Freeform Fabrication of Permanent Dental Restorations via Slurry Micro-Extrusion. *J Am Ceram Soc*, 89 (1): 346–9.

Khaled SA, Burley JC, Alexander MR, et al. 2014. Desktop 3D printing of controlled release pharmaceutical bilayer tablets. *Int J Pharm*, 461(1–2):105–11.

Azad MA, Olawuni D, Kimbell G, et al. 2020. Polymers for Extrusion-Based 3D Printing of Pharmaceuticals: A Holistic Materials-Process Perspective. *Pharmaceutics*, 12(2):124.

Chua CK, Leong KF, An J. 2014. 1 - Introduction to rapid prototyping of biomaterials. Woodhead Publishing.

Sun Y, Soh S. 2015. Printing Tablets with Fully Customizable Release Profiles for Personalized Medicine. *Adv Mater*, 27(47):7847-53.

Edelmann A, Dubis M, Hellmann R. 2020. Selective Laser Melting of Patient Individualized Osteosynthesis Plates-Digital to Physical Process Chain. *Materials (Basel)*, 13(24):5786.

Tan W, Gao C, Feng P, et al. 2021. Dual-functional scaffolds of poly(L-lactic acid)/nanohydroxyapatite encapsulated with metformin: Simultaneous enhancement of bone repair and bone tumor inhibition. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*, 120:111592.

Schubert C, van Langeveld MC, Donoso LA. 2014. Innovations in 3D printing: a 3D overview from optics to organs. *Br J Ophthalmol*, 98:159-161.



2019-1-BG01-KA203-062371

Hiller J, Lipson H. 2009. STL 2.0: A Proposal for a Universal Multi-Material Additive Manufacturing File Format". Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF'09), Aug 3-5 2009, Austin, TX, USA.



Project website: www.digit-biotech.eu

The European Commission's support for the production of this publication does not constitute an endorsement of the contents, which reflect the views only of the authors, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.