



SCHRIFTENREIHE 3D@KMU

Herausgeber:

Prof. Dr. Heiko Schinzer

ARBEITSBERICHT 1

VERFAHREN DER ADDITIVEN FERTIGUNG

Alexandra Fiedler

Unter dem Begriff „3D-Druck“ werden häufig alle Schichtbau-Verfahren subsummiert. Dieser Bericht gibt einen differenzierten Überblick über die wichtigsten Verfahren sowie deren Anwendungen und erläutert das Prinzip der additiven Fertigung.

Merseburg, Mai 2015

INHALT

Inhalt.....	1
1. Einführung.....	2
2. Stereolithographie (SLA)	4
Poly-Jet Modeling (PJM).....	6
3. Selective Laser Sintering (SLS)	6
Electron Beam Melting (EBM).....	8
4. Layer Laminate Manufacturing (LLM)	8
5. Fused Layer Modeling (FLM)	10
6. 3D Printing (3DP).....	11
Literaturverzeichnis	14
Anhang	15

1. EINFÜHRUNG

In den letzten 25 Jahren hat sich abhängig von den Ausgangsmaterialien und den angewandten Techniken eine Vielzahl von additiven Fertigungsverfahren entwickelt. Allen gemein ist das Schichtbauprinzip bei

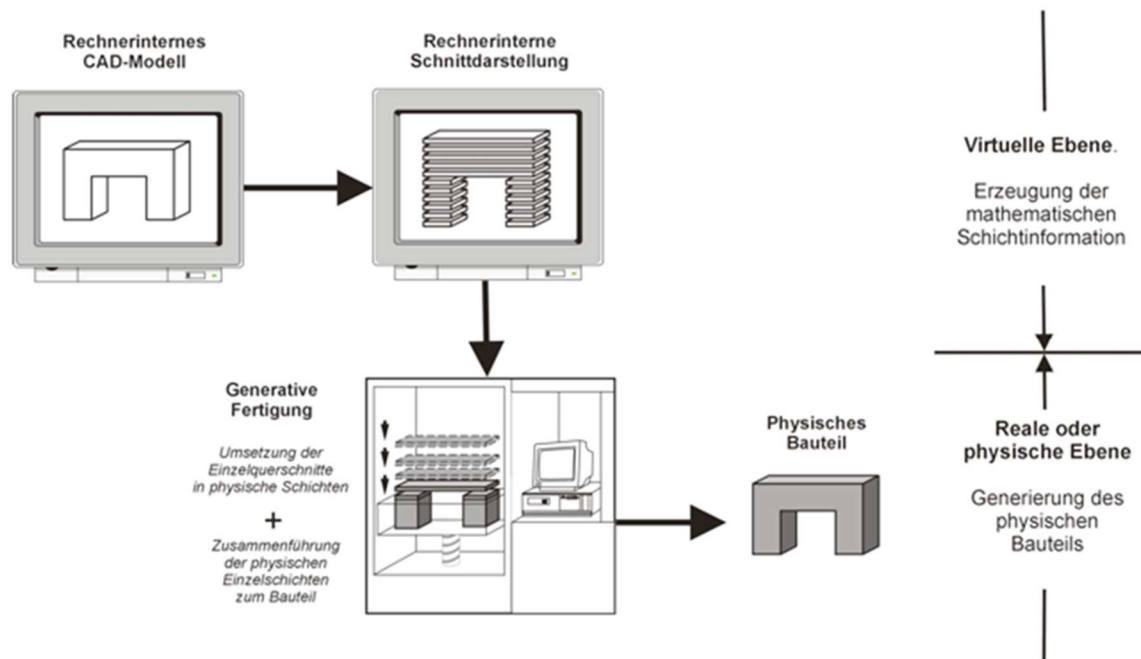


Abbildung 1: Prinzip der additiven Fertigung [Quelle: (Gebhardt, 2007, S. 14)]

dem Schichten gleicher Dicke aneinandergesetzt werden. Die Fertigung eines Bauteils erfolgt dabei direkt aus Computerdaten. Grundlage ist also ein CAD¹-Modell, welches entweder klassisch modelliert wird oder mit Mitteln des Reverse Engineering (3D-Digitalisierung) entsteht. Nachdem die Daten erfasst bzw. erstellt sind, erfolgt die Datenaufbereitung. Dazu zählen u.a. die Erzeugung von Stützkonstruktionen, das Anordnen der Bauteile im Bauraum und die Schichtdatengenerierung (Slicing). Diese aufbereiteten Daten werden für die physische Herstellung des Bauteils in einer additiven Fertigungsanlage genutzt. Im Anschluss werden eventuelle Stützkonstruktionen entfernt und gegeben falls das Bauteil von Pulverresten befreit.

¹ computer aided design

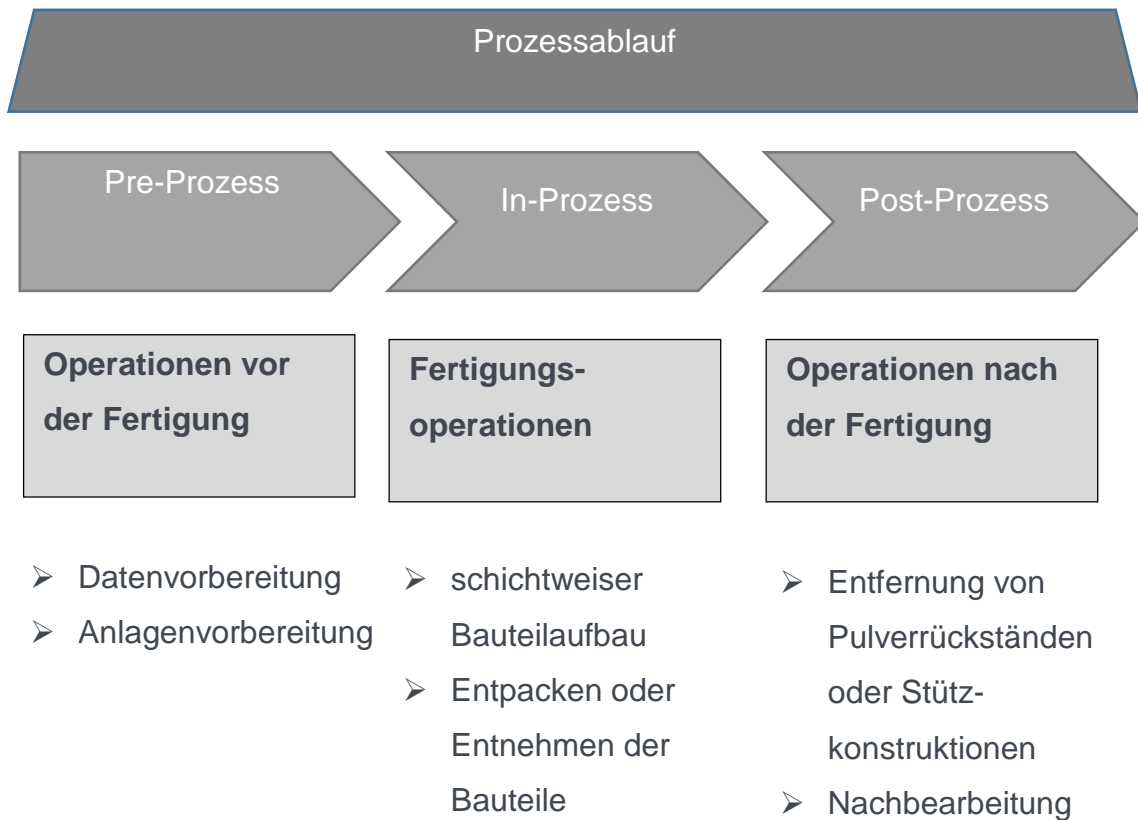


Abbildung 2: Prozessablauf der additiven Fertigung

Die Formgebung jeder einzelnen Schicht erfolgt flächig in der x-y-Ebene, auch Bauebene genannt. Die dritte Dimension entsteht nicht durch gleichmäßiges wachsen der z-Koordinate sondern durch das Aufeinanderfügen der Einzelschichten, was genau genommen ein 2 1/2D-Verfahren ist.

Nachfolgend werden die verschiedenen Verfahren erläutert. Wie eingangs schon erwähnt, gibt es viele Verfahren, die sich aber fünf Verfahrensgruppen zuordnen lassen. Für Interessierte befindet sich im Anhang eine ausführliche Übersicht der Verfahren ausgehend vom Aggregatzustand des Ausgangsmaterials.

Verfahrensgruppe	Beispiel	Abkürzung	Prinzip
Polymerisation	Stereolithographie	SLA	Lokal induzierte Polymerisation

Sintern	Selective Laser Sintering	SLS	Lokales Aufschmelzen von Pulverwerkstoffen
	Electron Beam Melting	EBM	
Laminieren	Layer Laminate Manufacturing	LLM	Ausschneiden und Fügen von Platten
Extrudieren	Fused Layer Modeling	FLM	Aufbringen von geschmolzenen Polymeren mittels Düsen
Bindertechnologie	3D-Printing	3DP	Binder wird in Pulverbett gezielt aufgebracht

Tabelle 1: Gliederung von Rapid-Technologien in Verfahrensgruppen [vgl. (Zäh, 2006, S. 33)]

2. STEREOGRAPHIE (SLA)

Stereolithographie zählt zu den ältesten Rapid-Technologien. Ausgangsstoff ist ein flüssiges Baumaterial (Fotoprepolymer-Kunstharze), welches durch Einwirken von Laserlicht lokal verfestigt wird. Nach der Verfestigung einer Schicht wird eine Bauplattform nach unten abgesenkt, ein Wischer verteilt den fotosensitiven Kunststoff gleichmäßig auf der vorherigen Schicht und ein Laser, über bewegliche Spiegel gesteuert, fährt über die auszuhärtenden Flächen. Um ein Wegschwimmen des Bauteils im flüssigen Bad zu verhindern, werden Stützkonstruktionen benötigt, die nach der Fertigung entfernt werden müssen.

Das Verfahren ist von hoher Genauigkeit und ermöglicht feine und glatte Oberflächen mit hohem Detailgrad, es ist typisch für Rapid Prototyping. Nachteilig ist die häufig geringe thermische und mechanische Belastbarkeit der fertigen Bauteile und die hohen Materialkosten, was die Stereolithographie zu eines der teuersten Verfahren der additiven Fertigung macht.

Stereolithographie

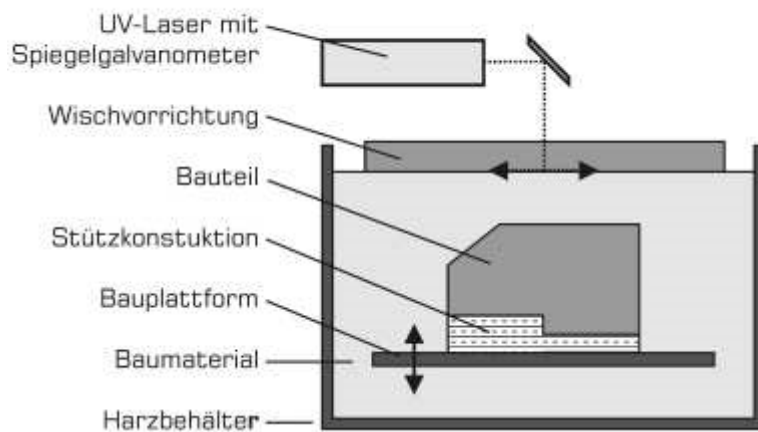


Abbildung 3: Prinzip der Stereolithographie [Quelle: (Hördler rapid engineering)]


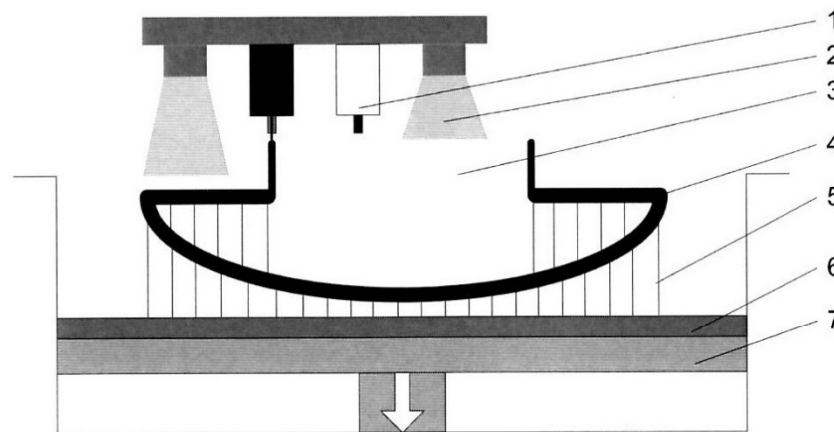
Steckbrief: SLA	
Grundprinzip	Schichtweises Aushärten von flüssigen Fotopolymeren mit UV-Licht
Aktivierungsenergie	UV-Strahlung von Laser und Lampen
Postprozess	Reinigen; Nachvernetzen/-härten im UV-Ofen
Materialien	Flüssig bis pastös: UV-aktivierbare Kunstharze
Anbieter	3D Systems, Stratasys, CMET, envision TEC, ...
Beispiel	 http://www.1zu1prototypen.com/urmodelle/oberflaechen.htm

Tabelle 2: Steckbrief SLA

Poly-Jet Modeling (PJM)

Bei diesem Verfahren kommen ebenfalls fotosensitive Harze zur Anwendung. Doch im Unterschied zur Stereolithographie entsteht das Objekt nicht aus einem Flüssigkeitsbad. Beim PJM wird durch einen



Prinzipdarstellung Poly-Jet Modelling

- 1 Druckköpfe
- 2 UV-Strahler
- 3 Verfestigungszone (Polymerisation)
- 4 generiertes Bauteil
- 5 Stützkonstruktion
- 6 Bauplatte
- 7 Bauplattform mit Hubtisch

Abbildung 4: Poly-Jet Modelling Prinzip [Quelle: (VDI 3405_2014-12, 2014, S. 14)]

beheizten Druckkopf das Material in Kleinsttröpfchen schichtweise aufgetragen, die per UV-Licht unmittelbar verhärtet werden. Stützmaterial wird hier nur für Überhänge und komplexe Formen benötigt, welches hinterher einfach entfernt werden kann. Vorteilhaft ist die Möglichkeit, verschiedene Materialien und Farben gleichzeitig verwenden zu können. Das Verfahren ist schnell und verhältnismäßig kostengünstig, so ist es insbesondere für Rapid Prototyping interessant, da es die Produktentwicklungszeit erheblich verkürzt.

3. SELECTIVE LASER SINTERING (SLS)

Grundwerkstoff für dieses Verfahren ist ein Pulver, wobei verschiedene Materialien wie Metalle², Kunststoffe, Keramiken oder Sande zum Einsatz kommen. Die Materialpartikel werden an der Oberfläche miteinander verschmolzen (gesintert), indem sie mittels Laser, der über Spiegel positioniert wird, nahe an ihre

² Das Verfahren zur Verarbeitung von Metallen wird Selective Laser Melting (SLM) genannt und ist eng mit dem SLS verwandt.

Schmelztemperatur gebracht werden. Stützmaterial ist nicht notwendig, da das Pulverbett das Bauteil stützt. Das fertige Bauteil muss nach Fertigungsende lediglich von Pulverresten befreit werden.

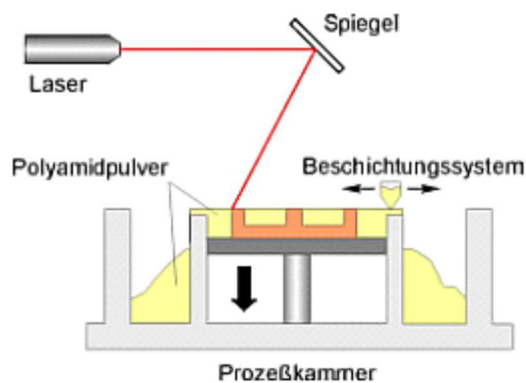


Abbildung 5: Selective Laser-Sinter Prinzip

Ist eine Schicht fertiggestellt fährt die Bauplatzform um eine Schichtdicke nach unten, das Pulver für die nächste Schicht wird verteilt, der Laser kommt zum Einsatz und der Vorgang wird wiederholt. Die Bauteile weisen eine raue Oberfläche auf, abhängig von der verwendeten Partikelgröße ist auch der Detailgrad, der erreicht werden kann. Ein weiterer zu berücksichtigender Punkt ist das

Materialverhalten bei der Abkühlung, hier kann es zum Beispiel zu Schrumpfungsprozessen kommen. Aufgrund der Porosität ist ein typischer Folgeprozess bei diesen verfahren das Tauchen des fertigen Bauteils in flüssiges Kupfer bzw. Harz oder das Glätten durch Perlstrahlen. Positiv sind die vielseitige Materialpalette beim SLS und die hohe mechanische und thermische Belastbarkeit der Produkte, was es nicht nur für den Bau von Prototypen sondern auch von Endprodukten interessant macht.

Steckbrief: SLS	
Grundprinzip	Lokales Aufschmelzen von pulverförmigem Ausgangsmaterial durch einen Laser
Aktivierungsenergie	Erwärmung durch Laser und Strahler
Postprozess	Kontrolliertes Abkühlen, Reinigen mittels Druckluft, Oberflächenverbesserung durch Gleitschleifen, Strahlen, Lackieren
Materialien	pulverförmig: teilchenverstärkte Polymere, Polymermischungen, Metalllegierungen, Keramiken
Anbieter	3D Systems, EOS, Concept Laser, ...



Tabelle 3: Steckbrief SLS

Electron Beam Melting (EBM)

Dieses Verfahren ist verwandt mit dem SLS und SLM und wird zur Herstellung von Metallbauteilen genutzt. Der Unterschied besteht darin, dass hier zur lokalen Aufschmelzung des pulverförmigen Materials kein Laser sondern ein Elektronenstrahl zum Einsatz kommt. Die schwedische Firma Arcam ist führend in diesem Bereich und entwickelt ihre Anlagen weiter, vor allen was die Verfahrensgeschwindigkeit angeht.

4. LAYER LAMINATE MANUFACTURING (LLM)

Eine mit Klebstoff beschichtete Folie oder Platte aus Papier, Kunststoff oder Metall wird schichtweise auf eine Bauplattform bzw. fertiges Produkt aufgebracht. Ein Laser, Messer oder Fräser schneidet die Konturen einer jeden Schicht aus, das nicht benötigte Material dient für eventuelle überlappende Bauteilkonturen als Stütze und muss nach Beendigung des Bauvorgangs entnommen werden.

Häufig wird dieses Verfahren auch als Laminated Object Manufacturing (LOM) bezeichnet, was allerdings ein eingetragenes Warenzeichen der Firma Cubic Technologies ist und somit nicht als Gattungsbegriff geeignet ist.

Vor allen bei Papiermodellen ist als Post-Prozess eine sofortige Fixierung mit Lacken notwendig, damit die wasseranziehenden Bauteile an freistehenden Ecken und Kanten nicht delaminieren. Weiterhin werden die fertigen Bauteile häufig durch Schleifen nachbearbeitet.

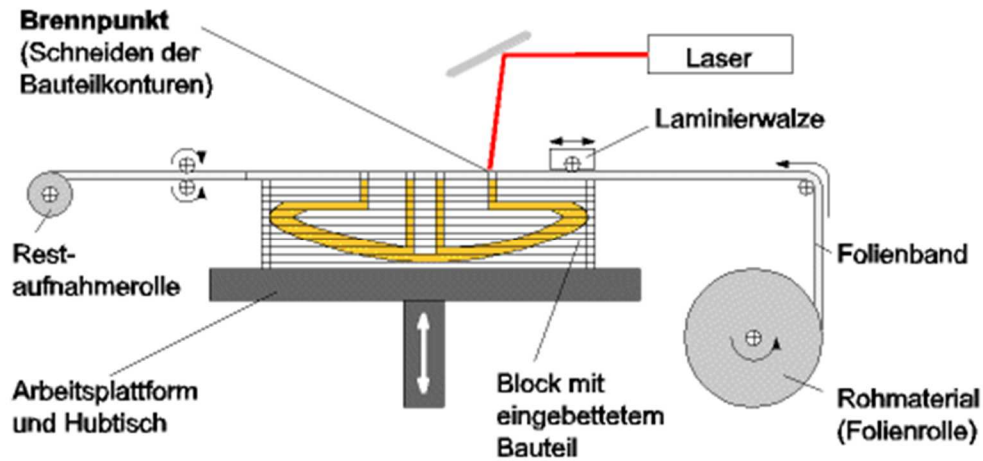


Abbildung 6: Layer Laminated Manufacturing Prinzip [Quelle: (Universität Magdeburg)]

Aufgrund der Möglichkeit günstige Werkstoffe wie Papier verwenden zu können, macht es LLM zu eines der preisgünstigsten Verfahren des Rapid Prototyping. Das Verfahren ist außerdem optimal für großvolumige Bauteile geeignet, da das fertige Bauteil praktisch keine inneren Spannungen und dadurch keine unerwünschten Verformungen aufweist.

Steckbrief: LLM	
Grundprinzip	Fügen (meist mit Kleber) von Folien oder Platten mit anschließendem Ausschneiden
Aktivierungsenergie	Wärmeleitung zum Aufschmelzen des Heißklebers zur Verbindung der Schichten oder Verwendung anderer geeigneter Fügeverfahren
Postprozess	Entfernen der Reststücke, Finishen (Lackieren oder Beschichten), gegebenenfalls Sintern
Materialien	Vorgefertigte Folien aus Papier, Kunststoff, Metallen, Keramik
Anbieter	Cubic Technologies, 3D Systems, ...



Tabelle 4: Steckbrief LLM

5. FUSED LAYER MODELING (FLM)

Häufig wird das Verfahren auch als Fused Deposition Modeling (FDM) bezeichnet. Es ist auf Scott Crump, dem Gründer der Firma Stratasys zurückzuführen.

Ein thermoplastischer Draht wird hierbei mittels beheizter Düse aufgeschmolzen und auf eine Bauplattform extrudiert. Um Konturen abzubilden werden gekrümmte Stränge unterschiedlicher Länge abgelegt, die abkühlen und erstarren. Die Wärmeleitung beim Kontakt mit dem Modell reicht zur Verfestigung und Schichtbildung aus. Ein dreidimensionales Objekt entsteht durch das Absenken der Bauplattform. Auf Grund dessen, dass die Stränge aufeinander abgelegt werden und der Stoffschluss beim

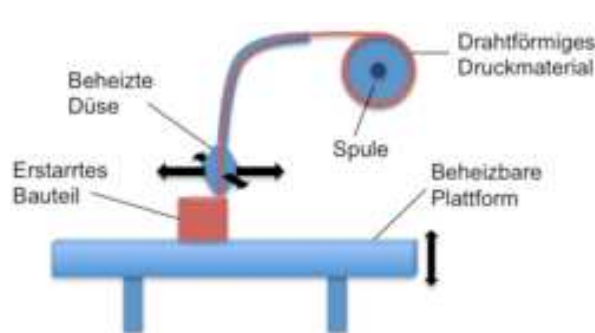


Abbildung 7: Fused Deposition Modeling Prinzip
[Quelle: (BIOPRO Baden-Württemberg GmbH)]

Erkalten erfolgt, ist die Oberflächenqualität relativ niedrig. Für Überhänge werden Stützkonstruktionen benötigt, die später wieder entfernt werden müssen. Dazu wird durch eine zweite Düse ein Material speziell für Stützstrukturen zugeführt, um eine unkomplizierte Entfernung des Materials nach Fertigungsende zu gewährleisten.

Steckbrief: FLM	
Grundprinzip	Ausschmelzen eines drahtförmigen Ausgangsmaterials mit Hilfe einer beheizten Düse


Aktivierungsenergie	Wärmeleitung im Düsen-/Druckkopf zum Erwärmen/Erweichen/Aufschmelzen des Ausgangsmaterials
Postprozess	Stützkonstruktionen mechanisch oder mittels Laugen entfernen, Reinigen, Beschichten
Materialien	strang- oder filamentförmig: ein oder zwei unterschiedliche Polymere
Anbieter	Stratasys, 3D Systems, ...
Beispiel	 http://www.1zu1prototypen.com/urmodelle/fdm.htm

Tabelle 5: Steckbrief FLM

6. 3D PRINTING (3DP)

Hinter dem 3D Printing verbirgt sich die sogenannte Pulverbinder-Technologie. Zunächst wird eine Pulverschicht aufgetragen danach wird durch einen Ink-Jet-Druckkopf (eingefärbte) Binderflüssigkeit auf den Schichtquerschnitt des zu erstellenden Bauteils eingespritzt. Der Binder bewirkt, dass sich die Schicht selbst und auch mit der darunterliegenden Schicht verbindet. Das Einfärben des Binders ermöglicht es farbige Bauteile oder Bereiche in Bauteilen zu realisieren. Ist eine Schicht fertiggestellt senkt sich die Bauteilplattform ab und die nächste Schicht kann generiert werden. Überschüssiges Material wird nach Fertigstellung entfernt.

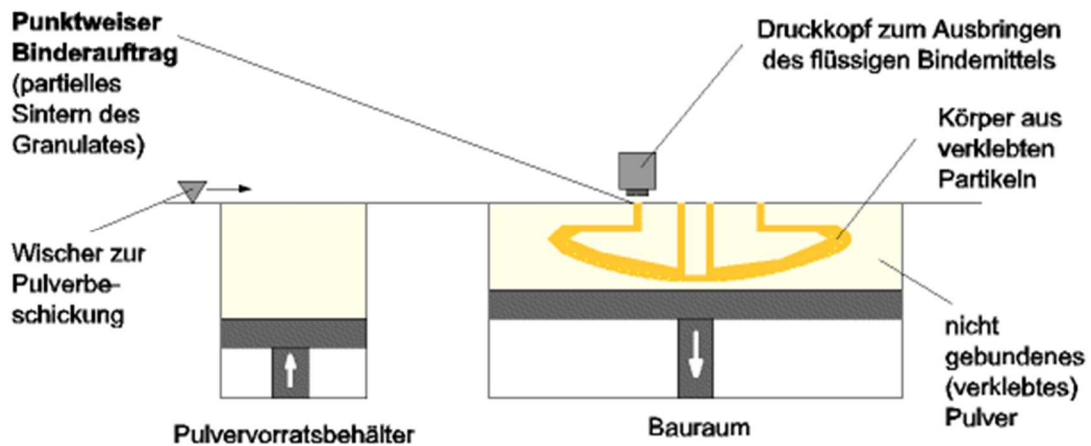
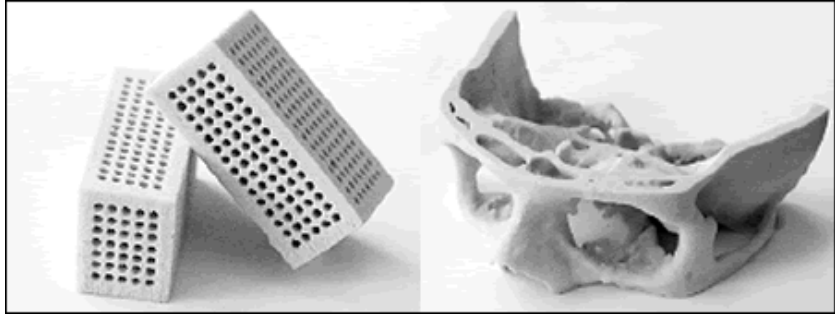


Abbildung 8: Prinzip des 3D Printings [Quelle: (Universität Magdeburg)]

Das Verfahren ist durch eine hohe Baugeschwindigkeit und -genauigkeit gekennzeichnet. Es lassen sich also komplexe Geometrien herstellen, ohne dass Stützkonstruktionen notwendig wären. Die Zerbrechlichkeit der gefertigten Modelle macht Infiltration mit Wachs oder Epoxidharz notwendig, danach sind die Objekte sehr widerstandsfähig. Die Materialauswahl ist vielfältig, so lassen sich Kunststoffe, Keramiken, Metalle und auch Food oder Medikamente verarbeiten.

Steckbrief: 3DP	
Grundprinzip	Punkt-für-Punkt-Auftragen von Binder auf ein Pulverbett
Aktivierungsenergie	keine
Postprozess	kontrolliertes Abkühlen, Reinigen, Imprägnierung mit flüssigem Heißwachs oder Infiltrierung mit Epoxidharz oder Kleber, Sintern (Keramik)
Materialien	pulverförmig: Pulvergemische aus Gips, Polymere, Metalle, Keramiken, ... flüssig: Binder
Anbieter	Voxeljet, 3D Systems, Z Corporation, ...

Beispiel



<https://www.rtejournal.de/ausgabe5/1522>

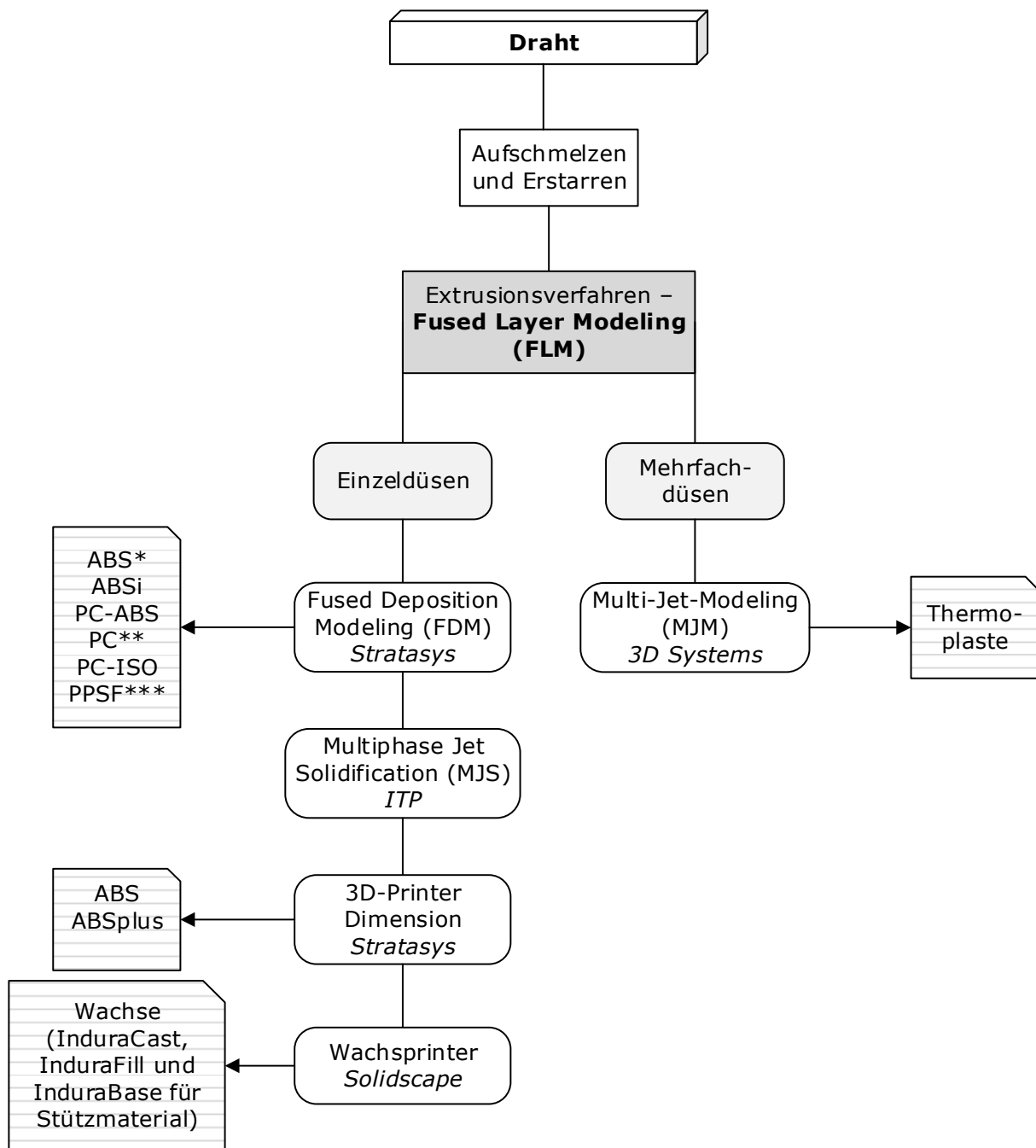
Tabelle 6: Steckbrief 3DP

LITERATURVERZEICHNIS

- BIOPRO Baden-Württemberg GmbH. (kein Datum). *3D-Druck*. Abgerufen am 10. März 2015 von http://www.bio-pro.de/biofabnet/wissen/3d_druck/index.html?lang=de
- Fastermann, P. (2012). *3D-Druck / Rapid Prototyping. Eine Zukunftstechnologie – kompakt erklärt*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg.
- Gebhardt, A. (2007). *Generative Fertigungsverfahren. Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Rapid Manufacturing* (3. Ausg.). München: Carl Hanser Verlag.
- Gebhardt, A. (kein Datum). *RTEjournal*. Abgerufen am 18. März 2015 von <https://www.rtejournal.de>
- Hördler rapid engineering. (kein Datum). Abgerufen am 17. März 2015 von <http://www.hoerdler.de/stereolithographie/stereolithographie-verfahren.htm>
- Stratasys Ltd. (kein Datum). *PolyJet-Technologie*. Abgerufen am 18. März 2015 von <http://www.stratasys.com/de/3d-drucker/technologies/polyjet-technology>
- Universität Magdeburg. (kein Datum). *Layer Laminated Manufacturing*. Abgerufen am 18. März 2015 von <http://lkt.mb.uni-magdeburg.de/html/>
- VDI 3405_2014-12. (2014). *Additive Fertigungsverfahren. Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen*. Berlin: Beuth Verlag.
- Zäh, M. (2006). *Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien. Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren*. München Wien: Carl Hanser Verlag.

ANHANG

[in Anlehnung an (Gebhardt, 2007)]



* Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymerisat

** Polycarbonate

*** polyphenylsulfone

