



Bibliothek des technischen Wissens

Berger Uwe
Hartmann Andreas
Schmid Dietmar

3D-Druck – Additive Fertigungsverfahren

RAPID PROTOTYPING • RAPID TOOLING • RAPID MANUFACTURING

2. Auflage, mit Bilder-CD

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL • Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG,
Düsseldorfer Straße 23 • 42781 Haan-Gruiten

Europa-Nr.: 50335

Die Autoren des Buches:

Berger, Uwe	Dr.-Ing., Prof.,	Aalen
Hartmann, Andreas	Dipl.-Ing. (FH),	Stadtbergen
Schmid, Dietmar	Dr.-Ing., Prof.,	Essingen

Lektorat und Leitung des Arbeitskreises: Prof. Dr.-Ing. Dietmar Schmid, Essingen

Bildbearbeitung: Zeichenbüro des Verlags Europa-Lehrmittel, Ostfildern
Agathe Schmid-König, Technische Illustration und Gestaltung, 64668 Rimbach
Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpf

Dem Buch wurden die neuesten Ausgaben der Normen und Gesetze zu Grunde gelegt. Verbindlich sind jedoch nur die Normblätter selbst und die amtlichen Gesetzestexte. Daten und Darstellungen, die sich auf Herstellerangaben beziehen sind gewissenhaft recherchiert. Sie sind aber mit keiner Gewährleistung irgendwelcher Art verbunden und können sich durch weiteren Fortschritt auch verändert haben. Der Verlag und die Autoren übernehmen daher in keiner Weise irgendwelche Verantwortung oder Haftung aus der Nutzung von Daten oder Darstellungen dieses Buches.

Wie in Lehrbüchern üblich werden etwa bestehende Patente, Gebrauchsmuster oder Warenzeichen nicht erwähnt. Das Fehlen eines solchen Hinweises bedeutet daher nicht, dass die dargestellten Produkte frei davon sind. Die Bilder sind von den Autoren entworfen oder entstammen aus deren Arbeitsumfeld. Soweit Bilder, insbesondere Fotos, einem Copyright Dritter unterliegen, sind diese mit dem ©-Symbol und dem Urhebernamen versehen.

2. Auflage 2017

Druck 5 4 3 2 1

Alle Drucke derselben Auflage sind parallel einsetzbar, da sie bis auf die Korrektur von Druckfehlern unverändert sind.

ISBN 978-3-8085-5034-2

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der gesetzlich geregelten Fälle muss vom Verlag schriftlich genehmigt werden.

© 2017 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
<http://www.europa-lehrmittel.de>

Umschlaggestaltung: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald und Grafik und Sound, 50679 Köln
unter Verwendung von Fotos des Lektors

Satz: Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpf

Druck: M. P. Media-Print Informationstechnologie GmbH, 33100 Paderborn

Vorwort

Die **Additive Fertigung** (Additive Manufacturing, AM) wird umgangssprachlich auch als **3D-Druck** bezeichnet, wobei die typische Drucktechnologie nur für einige der additiven Verfahren gilt. Aufgrund der ursprünglich langen Prozesszeiten und der früheren Mängel in Bezug auf die Bauteilfestigkeit war die Nutzung fast nur im Bereich des *Rapid Prototyping* angesiedelt. Inzwischen werden additiv auch Werkzeuge (*Rapid Tooling*) und Werkstücke (*Rapid Manufacturing*) auch für Endanwendungen hergestellt. Der besondere Vorteil ist, dass fast beliebige räumliche Gebilde direkt aus einer Computer-3D-Darstellung automatisiert produziert werden können. Kennzeichnend für die *Additive Fertigung* ist eine Formgebung durch Zusammenfügen (Addition) elementarer Volumenelemente, meist von vielen sehr dünnen Schichten. Die Materialien sind vielfältig: Polymere, Metalle, Keramiken, Papier und auch lebende Zellen. Ebenso vielfältig sind die Anwendungen: Bauteile, Werkzeuge, Modelle, museale Repliken, Skulpturen, Textilien, Schmuck und transplantierbare Gewebe.

Inzwischen ist die *Additive Fertigung* in der Serienproduktion angekommen. So werden in der Automobilindustrie bereits zehntausende Teile additiv hergestellt. Die im Preissegment unterhalb 5000 \$ liegenden sogenannten Personal-3D-Drucker, bzw. Desktop-3D-Drucker, haben sich mittlerweile nicht nur in Schulen, Hochschulen und im Privatsektor etabliert. Ungefähr die Hälfte derartiger im Jahr 2015 verkauften Geräte befinden sich im professionellen und industriellen Einsatz.

Für die **2. Auflage** wurden alle Kapitel überarbeitet. Es gibt mit aktueller **Normung und Standards** auch eine veränderte Terminologie, vor allem in den Kurzbezeichnungen. Hinzu kommen neuartige **Materialien** und **Prozesse**. Besonders hervorzuheben ist das neue Kapitel **Aufbau von AM-Anlagen**. Darin ist das Augenmerk auf die Bauweisen und Konstruktionsdetails der in der Additiven Fertigung eingesetzten Geräte und Gerätekomponten gerichtet, was bislang in der einschlägigen Literatur wenig vermittelt wird.

Gegliedert ist das Lehrbuch in folgende Kapitel:

- Einführung,
- Prozessketten,
- Potenziale Additiver Fertigung (AM),
- Prozessarten,
- Aufbau der AM-Anlagen,
- 3D-Datenfluss,
- 3D-Scannen,
- Virtuelle Umgebung.

Beigefügt ist dem Buch eine CD mit den meisten Bildern. Damit können Lehrende, Schüler und Studierende das Wissens- und Erfahrungsmaterial des Buches mit Whiteboard oder Notebook gut präsentieren und in eigene Ausarbeitungen implementieren¹.

Hinweise und Verbesserungsvorschläge können dem Verlag und damit den Autoren unter der E-Mail Adresse lektorat@europa-lehrmittel.de gerne mitgeteilt werden.

Winter 2016/2017

Die Autoren

¹ **Rechtliche Hinweise.** Lehrer an allgemeinbildenden und beruflichen Schulen sowie Ausbilder dürfen die Bilder und Lernbilder zur Erstellung von Unterrichtsmaterialien für ihren eigenen Unterricht verwenden und in Klassenstärke in Papierform vervielfältigen. Eine Weitergabe in digitaler Form oder das Veröffentlichen im Internet oder in einem Intranet sind nicht erlaubt. Schüler dürfen die Bilder und Lernbilder im Rahmen des Schulunterrichts für die Ausarbeitung von Referaten, Power-Point-Präsentationen etc. verwenden. Eine Vervielfältigung in Papierform in der für den Unterricht notwendigen Anzahl ist erlaubt, eine digitale Weitergabe oder das Veröffentlichen im Internet oder in einem Intranet dagegen nicht. Dozenten an Fachhochschulen und Universitäten dürfen die Bilder und Lernbilder in einem Skript verwenden, das über einen Beamer, ein Whiteboard oder Ähnliches während einer Vorlesung den Studenten präsentiert wird. Eine Vervielfältigung der Skripte ist ohne Genehmigung des Verlags nicht erlaubt. Ebenso ist eine Weitergabe in digitaler Form oder das Veröffentlichen im Internet oder in einem Intranet nicht gestattet. In allen hier aufgeführten Fällen ist eine Quellenangabe obligatorisch. Alle weiteren Nutzungen müssen beim Verlag schriftlich angefragt werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	7	4	Prozessarten	78
1.1	Additive und subtraktive Fertigung	8	4.1	3D-Druck	78
1.2	Systematik der additiven Fertigungsverfahren	10	4.1.1	Allgemeines	78
1.2.1	Gasförmiger Ausgangszustand	11	4.1.2	Pulververarbeitende Systeme	79
1.2.2	Flüssiger Ausgangszustand	13	4.1.2.1	Systemkomponenten	80
1.2.3	Fester Ausgangszustand	14	4.1.2.2	Postprocessing	81
1.2.3.1	Drahtförmige Materialien	15	4.1.2.3	Pulveraufbereiten	82
1.2.3.2	Lamine	15	4.1.2.4	Infiltrieren	83
1.2.3.3	Pulver	15	4.1.2.5	Prozesse	84
1.2.4	Standards	18	4.1.2.6	Besondere Verfahren	86
1.3	Stützstrukturen	20	4.1.3	Direkter Materialauftrag	88
1.3.1	Schichtbauprinzipien	21	4.1.3.1	Allgemeines	88
1.3.2	Stützstrukturgestaltung	22	4.1.3.2	Anlagen	88
1.4	Postprozess	25	4.1.3.3	Materialien und Verfahren	89
1.4.1	Auspackanlagen	25	4.1.3.4	Stützkonstrukte	90
1.4.2	Bauteilveredlung	25	4.1.3.5	Anforderungen an die Druckköpfe	91
1.4.3	Thermische Nachbehandlung	26	4.1.3.6	Schichterzeugung	92
1.4.4	Gefahren im Postprozess	26	4.1.3.7	Postprocessing	94
2	Prozessketten	27	4.1.3.8	Multi-Jet Modeling (MJM)	94
2.1	Rapid Product Development (RPD)	27	4.1.3.9	3D-Wax-Printing	95
2.2	Modellarten	29	4.1.3.10	Poly-Jet-Modeling (PJM)	97
2.3	Rapid Prototyping (RP)	31	4.2	Selektives Lasersintern (LS)	98
2.4	Rapid Tooling (RT)	34	4.2.1	Funktionsprinzip	98
2.4.1	Direkte Herstellung von Formen und Werkzeugen	34	4.2.2	LS-Prozess	99
2.4.2	Indirekte Herstellung von Formen und Werkzeugen	36	4.2.2.1	Teilevorbereitung	100
2.5	Rapid Manufacturing (RM)	39	4.2.2.2	Anfertigung	101
3	Potenziale Additiver Fertigung (AM)	41	4.2.2.3	Nachbearbeitung	102
3.1	Entwicklungsgang	41	4.2.3	Laser	102
3.2	Materialien	42	4.2.4	LS-Baumaterialien	103
3.2.1	Kunststoffe	44	4.2.5	Erzielbare Genauigkeit	104
3.2.1.1	Photopolymerisation	48	4.2.6	Maschinen-Realisierungen	104
3.2.1.2	Laser-Sintern (LS)	50	4.2.7	Anwendungsbereiche	105
3.2.1.3	Extrudieren	51	4.3	Selektives Maskensintern (SMS)	106
3.2.1.4	Pulverdruck-Polymerisation	52	4.3.1	Allgemeines	106
3.2.2	Metalle	52	4.3.2	Verfahren mit direkter Belichtung	107
3.2.3	Minerale	55	4.3.3	Verfahren mit Abbildeoptik	108
3.3	Anwendungsgebiete	56	4.3.4	Materialien und Beispiele für Teile	109
3.3.1	Integralbauteile	58	4.4	Additiver Verarbeitung von Metallen	110
3.3.2	Mode-Design	60	4.4.1	Pulverstrahlbasierte Verfahren	111
3.3.3	Zerstörungsfreie Archäologie	61	4.4.2	Drahtbasierte Verfahren	111
3.3.4	Architektur	63	4.4.3	Pulverbettbasierte Verfahren	111
3.3.5	Bio-Manufacturing	64	4.4.3.1	Funktionsprinzip	113
3.3.5.1	Dentaltechnik	64	4.4.3.2	Der Strahlschmelzprozess	113
3.3.5.2	Prothetik und Herstellung von chirurgischen Modellen	66	4.4.3.3	Teilvorbereitung	114
3.3.5.3	Hörakustik	68	4.4.3.4	Anfertigung	114
3.3.5.4	Tissue Engineering	69	4.4.3.5	Strahlquellen	114
3.3.6	Personal-3D-Printer (Desktop-3D-Printer)	72	4.4.4	Baumaterialien	115
3.3.7	3D-MID	74	4.4.5	Erzielbare Genauigkeiten	115
3.4	3D-Druck von Elektronikkomponenten	74	4.4.6	Maschinen-Realisierungen	115
			4.5	Layer Laminated Manufacturing (LLM)	117
			4.5.1	Traditionelle Schichtbauweisen	117
			4.5.2	Automatisierung	118
			4.5.3	Materialien	119
			4.5.4	LLM-Verfahren	120
			4.5.4.1	Laminated Object Modeling (LOM)	120
			4.5.4.2	Paper Laminated Technology (PLT)	122
			4.5.4.3	MCo-Verfahren	123
			4.5.4.4	PVC Laminated Technology	125
			4.5.4.5	Layer Milling Process (LMC)	126

4.5.4.6	Automatisierung mit Roboter	127	5.5.2	Druckverfahren	169
4.5.4.7	Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM)	128	5.5.3	Auflösung, Genauigkeit und Frequenz	173
4.6	Fused Layer Modeling (FLM)	129	5.5.4	Aufbau des Drucksystems	175
4.6.1	Funktionsprinzip	129	5.5.5	Sonderformen	176
4.6.2	FLM-Prozess	130	5.6	Laserbasierte AM-Systeme	177
4.6.2.1	Teilevorbereitung	130	5.7	Thermische Düsensysteme	179
4.6.2.2	Anfertigung	132	5.7.1	Extrusionsköpfe für drahtförmige Werkstoffe	179
4.6.2.3	Nachbearbeitung	132	5.7.2	Extrusionsköpfe für thermisch plastifizierte Werkstoffe	180
4.6.3	Extrusionsköpfe	132	5.7.3	Extrusionsköpfe für thermisch geschmolzene Werkstoffe	180
4.6.4	Baumaterialien	132	5.8	Hybridsysteme	181
4.6.5	Erzielbare Genauigkeit	134	6	3D-Datenfluss	182
4.6.6	Maschinen-Realisierungen	134	6.1	CAD-Datenmodell	182
4.6.7	Anwendungsbereiche und Folgeprozesse	135	6.1.1	CAD-Flächenmodell	182
4.7	Stereolithographie (STL)	136	6.1.2	Volumenmodelle	184
4.7.1	Funktionsprinzip	136	6.2	Voxelmodell	184
4.7.2	Stereolithographie-Prozess	136	6.3	Schnittstellenformate	185
4.7.2.1	Teilevorbereitung	137	6.3.1	STL-Format	185
4.7.2.2	Anfertigung	138	6.3.2	SLC-Format	186
4.7.2.3	Nachbearbeitung	139	6.3.3	VRML-Format	187
4.7.3	Laser	139	6.3.4	Additive Manufacturing File Format (AMF)	188
4.7.4	STL-Baumaterialien	140	6.3.5	Weitere Datenformate	189
4.7.5	Erzielbare Genauigkeit	141	7	3D-Scannen	192
4.7.6	Maschinen-Realisierungen	141	7.1	Anwendungen	192
4.7.7	Anwendungsbereiche und Folgeprozesse	142	7.2	Triangulationstechnologie	193
4.8	Flächige UV-Belichtungsverfahren	144	7.2.1	Räumliche Wahrnehmung und Triangulation	193
4.8.1	Allgemeines	144	7.2.2	Erfassung von Punkten und Linien	194
4.8.2	Belichtungstechnologie	146	7.2.3	Streifenlichtscanner	195
4.8.2.1	Selektiv flächige Belichtung	147	7.2.3.1	Scannen mit Einzellichtpunkt	195
4.8.2.2	Belichtung mit DLP	147	7.2.3.2	Linienprojektionsverfahren	196
4.8.2.3	Belichtung mit Mikroshutter	148	7.2.3.3	Besonderheiten und Beispiele	198
4.8.3	Bauprozesse	149	7.2.4	Photogrammetrie	202
4.8.3.1	Solid Ground Curing	149	7.3	Autofokus-Systeme	204
4.8.3.2	Stationäre Belichtung von oben	149	7.4	Lichtlaufzeitsysteme	205
4.8.3.3	Stationäre Belichtung von unten	149	7.5	Theodolit-Messsysteme	205
4.8.3.4	Bewegte Belichtung	151	7.6	Röntgen-Computertomographie (CT)	206
5	Aufbau der AM-Anlagen	152	7.6.1	Allgemeines	206
5.1	Allgemeines zur Konstruktion	152	7.6.2	Funktionsweise und Technik	207
5.1.1	Z-Achse	154	7.6.2.1	CT in der industriellen Messtechnik	207
5.1.1.1	Z-Achse in konventionellen Systemen	154	7.6.2.2	Auflösung	208
5.1.1.2	Kastenloses Bauen	156	8	Virtuelle Umgebung	210
5.1.1.3	Continuous 3D-Printing	157	8.1	Allgemeines	210
5.1.1.4	Parallelkinematik	158	8.2	Szenensteuerung	211
5.1.1.5	Portalanlagen - Contour Crafting	159	8.3	Tracking	212
5.1.1.6	5-Achssysteme	159	8.4	Augmented Reality, Mixed Reality	213
5.1.2	Prozesskammer	160	Fachwörterbuch Deutsch-Englisch,		
5.1.3	Maschinengestelle	160	Sachwortverzeichnis	214	
5.2	Aufbau pulververarbeitender Systeme	161	Literatur	219	
5.2.1	Beschichtungssysteme	161	Normen und Richtlinien	220	
5.2.2	Pulverzuführung	162	Publikationen der Autoren	221	
5.2.3	Materialbevorratung	163	Quellenverzeichnis	222	
5.2.4	Formbehälter	163			
5.3	Aufbau flüssigkeitsverarbeitender Systeme	164			
5.4	Aufbau laminierender Systeme	166			
5.4.1	Materialversorgung	166			
5.4.2	Konturschneiden	166			
5.4.3	Schichtverbinden	167			
5.5	Druckkopfsysteme	168			
5.5.1	Allgemeines	168			

United States Patent [19]**Hull**[11] **Patent Number:** **4,575,330**[45] **Date of Patent:** **Mar. 11, 1986****[54] APPARATUS FOR PRODUCTION OF THREE-DIMENSIONAL OBJECTS BY STEREO LITHOGRAPHY**[75] **Inventor:** **Charles W. Hull, Arcadia, Calif.**[73] **Assignee:** **UVP, Inc., San Gabriel, Calif.**[21] **Appl. No.:** **638,905**

4,252,514	2/1981	Gates	425/162
4,288,861	9/1981	Swainson et al.	365/127
4,292,015	9/1981	Hritz	425/162 X
4,329,135	5/1982	Beck	425/174
4,333,165	6/1982	Swainson et al.	365/127 X
4,374,077	2/1983	Kerfeld	264/22
4,466,080	8/1984	Swainson et al.	365/127 X
4,471,470	9/1984	Swainson et al.	365/127

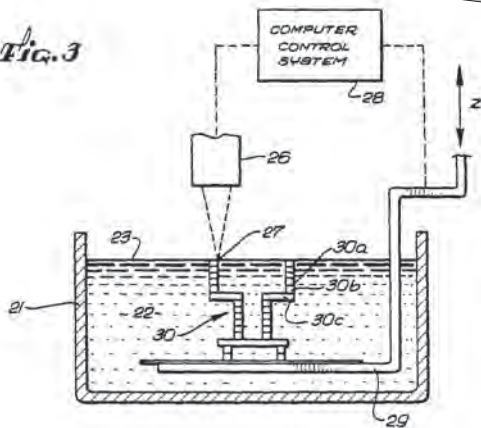
"Stereolithography" is a method and apparatus for making solid objects by successively "printing" thin layers of a curable material, e.g., a UV curable material, one on top of the other. A programmed movable spot beam of UV light shining on a surface or layer of UV curable liquid is used to form a solid cross-section of the object at the surface of the liquid. The object is then moved, in a programmed manner, away from the liquid surface by the thickness of one layer, and the next cross-section is then formed and adhered to the immediately preceding layer defining the object. This process is continued until the entire object is formed.

Essentially all types of object forms can be created with the technique of the present invention. Complex forms are more easily created by using the functions of a computer to help generate the programmed commands and to then send the program signals to the stereolithographic object forming subsystem.

Of course, it will be appreciated that other forms of appropriate synergistic stimulation for a curable fluid medium, such as particle bombardment (electron beams and the like), chemical reactions by spraying materials through a mask or by ink jets, or impinging radiation other than ultraviolet light, may be used in the practice of the invention without departing from the spirit and scope of the invention.

A presently preferred embodiment of the stereolithographic system is shown in elevational cross-section in FIG. 3. A container 21 is filled with a UV curable liquid 22 or the like, to provide a designated working surface 23. A programmable source of ultraviolet light 26 or the like produces a spot of ultraviolet light 27 in the plane of surface 23. The spot 27 is movable across the surface 23 by the motion of mirrors or other optical or mechanical elements (not shown) that are a part of light source 26. The position of the spot 27 on surface 23 is controlled by a computer or other programming device 28. A movable elevator platform 29 inside container 21 can be moved up and down selectively, the position of the platform being controlled by the computer 28. As the device operates, it produces a three-dimensional object 30 by step-wise buildup of integrated laminae such as 30a, 30b, 30c.

The surface of the UV curable liquid 22 is maintained at a constant level in the container 21, and the spot of UV light 27, or other suitable form of reactive stimulation, of sufficient intensity to cure the liquid and convert it to a solid material is moved across the working surface 23 in a programmed manner. As the liquid 22 cures and solid material forms, the elevator platform 29 that was initially just below surface 23 is moved down from the surface in a programmed manner by any suitable actuator. In this way, the solid material that was initially formed is taken below surface 23 and new liquid 22 flows across the surface 23. A portion of this new liquid is, in turn, converted to solid material by the programmed UV light spot 27, and the new material adhesively connects to the material below it. This process is continued until the entire three-dimensional object 30 is formed. The object 30 is then removed from the container 21, and the apparatus is ready to produce another object. Another object can then be produced, or some new object can be made by changing the program in the computer 28.

FIG. 3

1 Einführung

Im Jahr 1986 wurde ein neuartiges Fertigungsverfahren patentiert¹, welches die direkte Herstellung gegenständlicher Objekte aus einem 3D-Computermodell ermöglichen sollte. Als Werkstoff diente hierzu ein flüssiger Kunststoff, der durch Belichtung mit einem Laserstrahl zonenweise verfestigt werden konnte und durch Abfahren ebener Bahnkurven jeweils in übereinanderliegenden dünnen Schichten die Fertigung komplexester Teilegeometrien ermöglichte.

Diesem sogenannten *Stereolithographieverfahren*² folgten sehr bald eine Reihe von alternativen Verfahren, die allesamt den schichtweisen Aufbau von 3D-Objekten aus einem digitalen Computermodell heraus gemeinsam haben (**Bild 1**). Das herzustellende Teil wächst hierbei Bauschicht für Bauschicht auf einer Plattform auf, wobei in der Regel die oberste Schicht durch Absenken der Bauplattform auf konstantem Niveau gehalten wird. Derartige in 2¹/₂-D-Technik erfolgende Herstellungsverfahren werden auch als additive oder als generative Fertigungsverfahren bezeichnet.

Da diese neuartigen Fertigungsverfahren zunächst für den Prototypenbau innerhalb kurzer Zeitfristen prädestiniert schienen, wurde für sie der Begriff **Rapid-Prototyping** geprägt (**Bild 2**).

Nachdem bald immer leistungsfähigere Werkstoffe entwickelt wurden, eröffneten sich auch neue und innovative Möglichkeiten, Werkzeuge mittels dieser Verfahren in sehr kurzen Zeitspannen bereitzustellen. Damit war der Weg zum so genannten **Rapid-Tooling** geebnet, welches die Herstellung von kleinen und mittleren Losgrößen in Serienwerkstoffen erlaubt.

Die jüngste Phase der Entwicklung zielt darauf ab, serienidentische Endnutzerteile im direkten, werkzeuglosen Verfahren herzustellen, was als **Rapid-Manufacturing** bezeichnet wird. Der Schlüssel für die Effizienz von Rapid-Prototyping, Rapid-Tooling oder Rapid-Manufacturing liegt im Wegfall von jeglichen Werkzeugen und Formen für die Herstellung eines Bauteils sowie in einer wesentlich vereinfachten Maschinenkinematik, da der Bauprozess in der Regel schichtweise in 2¹/₂-D-Technik³ erfolgt. **Bild 3** zeigt als Anwendungsbeispiel von Rapid-Manufacturing ein im Stereolithographieverfahren hergestelltes Ohrpassstück für ein Hörgerät.

Auf dem Gebiet der Medizintechnik lassen sich durch schichtweises Aufbauen von 3D-Strukturen komplexester Gestalt bislang unerreichte An-

wendungen erschließen. Das so genannte *Tissue-Engineering* bzw. *Bio-Engineering* stellt die Herstellung künstlicher Organe für die regenerative medizinische Behandlung für die Zukunft in Aussicht.

¹ U.S. Patent 4,575,330; Erfinder: Charles W. Hull

² Hull hatte die Idee, abgeleitet aus der Flachdrucktechnik (z. B. der Lithographie), durch wiederholtes übereinander Drucken von dünnen Schichten räumliche Gebilde herzustellen, siehe Seite 6.

³ 2¹/₂-D-Technik. Begriff aus der NC-Technologie: Bahnerzeugung in der X-Y-Ebene und Zustellung in Z-Richtung.

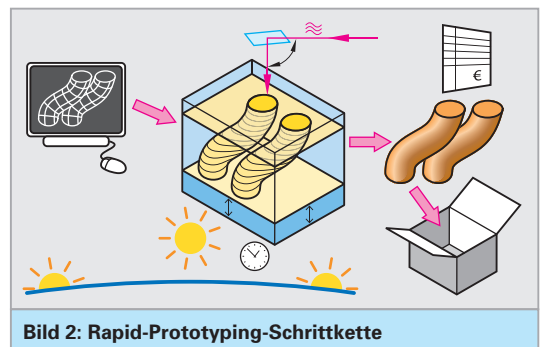
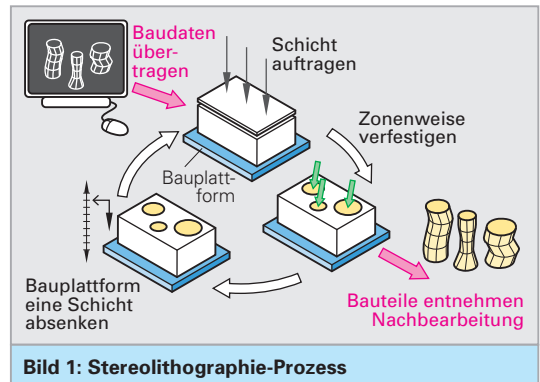


Bild 3: Im Stereolithographieverfahren hergestelltes Gehörkapsel

1.1 Additive und subtraktive Fertigung

Die Fertigungsverfahren werden nach DIN 8580 in sechs Hauptgruppen eingeteilt (**Bild 1**):

- | | |
|-----------------|-----------------------------|
| 1. Urformen, | 2. Umformen, |
| 3. Trennen, | 4. Fügen, |
| 5. Beschichten, | 6. Stoffeigenschaft ändern. |

Die in den Hauptgruppen 1 bis 4 eingesetzten Verfahren bestimmen die Form des Werkstücks und seinen stofflichen Zusammenhalt, die Verfahren der Hauptgruppen 5 und 6 zielen auf die Beeinflussung seiner Stoffeigenschaften ab.

Die ständige Weiterentwicklung der oben genannten Fertigungsverfahren ist ein Merkmal der Evolution des Menschen. Aber während diese vom Menschen genutzten Verfahren Werkzeuge und Formen benötigen, arbeitet die Natur mit völlig anderen Mitteln. Der Aufbau der von ihr erzeugten Strukturen erfolgt von innen heraus werkzeuglos und formlos. Ihre Materialien sind Kohlenwasserstoffe, Kalzium- und Siliziumverbindungen, und ihre Baupläne liegen als genetischer Kode in der DNA (Desoxyribonukleinsäuren) vor. Die für den Bauprozess erforderliche Energie wird chemisch, z. B. durch Verbrennung von Kohlenstoff und Sauerstoff bei Mensch und Tier, bzw. durch Photosynthese, wie in der Pflanzenwelt, erzeugt. Der Aufbau des Gehäuses einer Meeresschnecke verläuft schichtweise (**Bild 2**).

Die chemische Grundsubstanz ist Kalziumkarbonat. Dieser natürlichen Feinstruktur steht die

synthetische Architektur eines sogenannten **Scaffolds** (engl., Gerüst) gegenüber, das im Bio-Engineering mit einem in additiver Technik arbeitenden **3D-Drucker** hergestellt wurde (**Bild 3**).

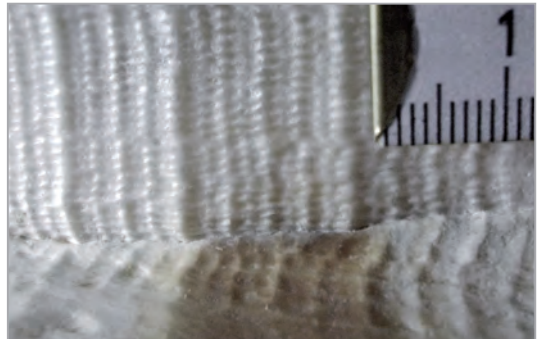


Bild 2: Schichtweiser Aufbau eines Schneckenhauses (Cassis cornuta)



Bild 3: Scaffold, Stützwerk für Knochensubstanz in der regenerativen Medizin

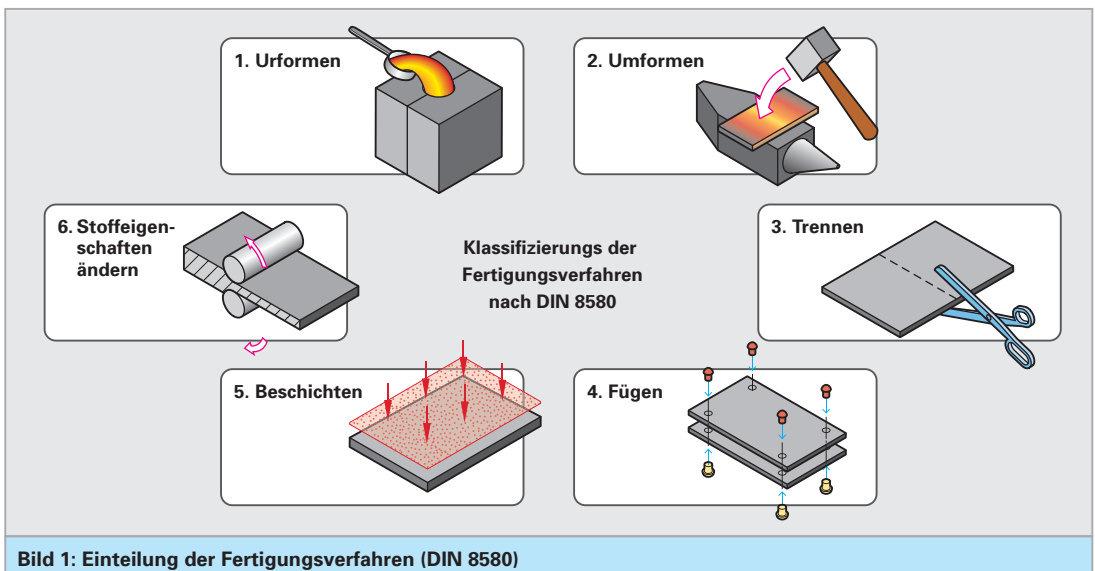


Bild 1: Einteilung der Fertigungsverfahren (DIN 8580)

Es wird als Stützwerk bei der künstlichen Erzeugung organischer Knochensubstanz in der Chirurgie benötigt. Der Herstellungsprozess für dieses Stützwerk verläuft in Anlehnung an die Bauweise des Schneckenhauses. Zunächst bilden aufeinanderfolgende Polymerschichten eine Matrixstruktur, in welcher sich Kalziumkarbonat ablagern kann. Nach und nach verschwindet die Polymermatrix und das mineralisierte 3D-Objekt bleibt übrig.

Erst seit den 1980er Jahren werden neuartige Fertigungsverfahren erforscht und entwickelt, die auf dieses Bauprinzip der Natur zurückgreifen. Man möchte Werkstücke beliebiger Komplexität und mit natürlichen Oberflächen in technischen Materialien herzustellen. Auf die Anwendung von Formen und Werkzeugen soll man verzichten können.

Ermöglicht wird dies durch die Fortschritte in der Computertechnologie, in der grafischen 3D-Datenverarbeitung und in der digitalen 3D-Messtechnik. Ein digitales 3D-Abbild des herzustellenden Werkstücks ist die Grundlage für den additiven Herstellungsprozess.

Der Begriff **Additive Fertigung** (engl. additive manufacturing, Kurzbezeichnung **AM**), hat sich aus dem angelsächsischen Sprachraum verbreitet und verbildlicht den fundamentalen Unterschied der neuen Techniken zu den traditionellen, **subtraktiv wirkenden Herstellungsverfahren**. Auch zu den urformenden und umformenden Verfahren besteht der deutliche Unterschied, dass kein Formwerkzeug gefertigt werden muss, was wiederum einen subtraktiv wirkenden vorangehenden Vorgang erfordern würde.

Umgangssprachlich wird die Additive Fertigung als **3D-Druck** (Normschreibweise: *3-D-Druck*) bezeichnet und die zugehörigen Apparate bzw. Maschinen als **3D-Drucker**.

Die derzeit industriell angewandten additiv wirkenden Fertigungsverfahren sind $2\frac{1}{2}$ -D-Techniken. Sie arbeiten *direkt-generativ*. *Direkt* bedeutet, dass die Geometrie des zu erzeugenden Gegenstands unmittelbar aus der digitalen, d. h. in der EDV vorliegenden Darstellung abgeleitet wird. *Generativ* besagt, dass das Teilevolumen schichtenweise anwächst, bis es sein Endvolumen gemäß dem digitalen Modell einnimmt.

Treppenförmige Strukturen sind charakteristisch für additiv hergestellte Oberflächen. Sie treten umso auffälliger in Erscheinung, je flacher die so gefertigten Schrägen sind. Am Beispiel einer sphärischen Oberfläche wird dieser Effekt deutlich.

Die **Bilder 1 bis 3** zeigen die Oberflächenstruktur an SL-, 3DP- und FLM-Teilen, die in Bauschichtstärken von 0,1 mm hergestellt wurden.

Additive Fertigungsverfahren arbeiten werkzeuglos und ohne Form. Das Volumen eines Objekts wird dabei schichtweise oder direkt in drei Dimensionen gemäß einem digitalen Computermodell aufgebaut.

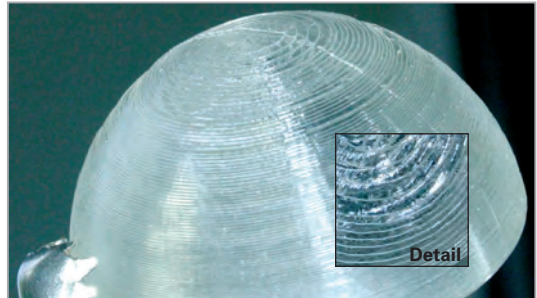


Bild 1: Treppenförmige Oberflächenstruktur eines im SL-Verfahren (Stereolithographie) hergestellten Teils

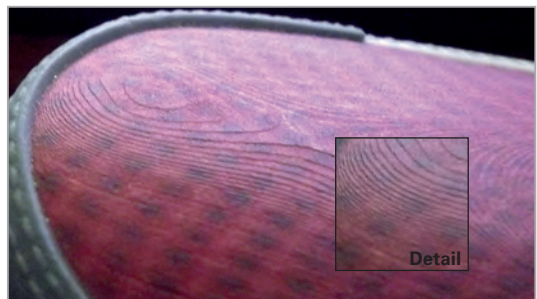


Bild 2: Treppenförmige Oberflächenstruktur eines im 3DP-Verfahren (3D-Printing) hergestellten Teils

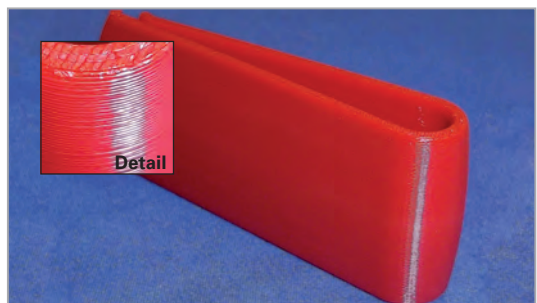


Bild 3: Treppenförmige Oberflächenstruktur eines im FLM-Verfahren (Fused Layer Modeling) hergestellten Teils

1.2 Systematik der additiven Fertigungsverfahren

DIN 8580 ordnet die Produktionsprozesse in Gruppen und untergliedert diese nach den eingesetzten Fertigungsverfahren. Die technischen Realisierungsmöglichkeiten generativer Herstellungsprozesse beruhen darauf, dass abhängig vom Baumaterial, das fest, flüssig oder gasförmig sein kann, ein geeignetes Fertigungsverfahren nach DIN 8580 zum schichtweisen Aufbau des Werkstücks genutzt wird. Zum Beispiel wird das schichtweise Urformen aus dem flüssigen Zustand beim Stereolithographieverfahren genutzt, die entsprechende Klassifizierungsnummer ist 1.1 (**Bild 1**).

Verschmelzen aus dem festen Zustand (4.6) wird bei den Lasersinter- und Laserstrahlschmelzverfahren eingesetzt, Extrudieren (1.2) beim Fused Layer-Modeling-Verfahren.

Eine Vielzahl entsprechender Wirkprinzipien ist erprobt, aber nicht alle sind erfolgreich kommerzialisiert worden.

Der gasförmige Aggregatzustand ermöglicht das additive Aufbringen feinsten Schichten und ist daher die Basistechnologie für die Halbleiter- und Elektronikbranche. Das additive Auftragen aus der Festphase ist Grundlage für die Herstellung großformatiger Werkstücke mittels draht- oder pulverstrahlbasierten Auftragsschweißens oder pulverbettbasierten Strahlschmelzens, beispielsweise in den Branchen des Maschinenbaus oder der Luft- und Raumfahrttechnik. Sind feinere Oberflächen an Teilen mittleren und kleineren Formats gefordert, wie z. B. in der Medizintechnik oder allgemein für Feingussanwendungen, so bietet sich die additive Fertigung aus der Flüssigphase an.

Additive Herstellungsprozesse können realisiert werden, indem der Werkstoff im festen Zustand schichtweise oder entlang einer 3D-Bahn auf einem Trägermedium aufgebracht und verfestigt wird. Hierfür werden Werkstoffe aus Kunststoffen, Metallen und Mineralen eingesetzt. Das Baumaterial kann in Drahtform, als Laminat oder als Pulver vorliegen. Die Verbindung kann durch Verkleben, Verbacken oder Verschmelzen erfolgen.

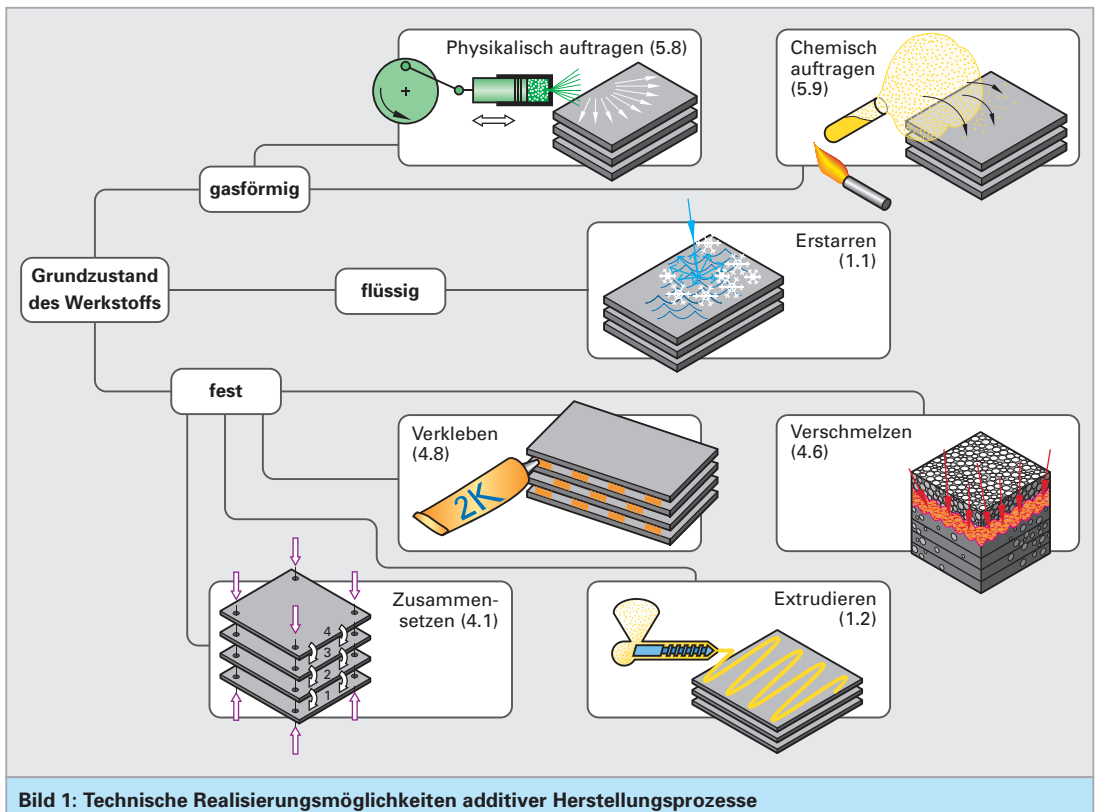


Bild 1: Technische Realisierungsmöglichkeiten additiver Herstellungsprozesse

1.2.1 Gasförmiger Ausgangszustand

Bei den Verfahren, die auf gasförmigem Zustand des Werkstoffs beruhen, unterscheidet man zwischen dem Grundprinzip des chemischen und dem des physikalischen Auftrags zur Bau-schichterzeugung (**Bild 1**).

Beides wird im Entwicklungsgang der Halbleitertechnologie beginnend in den 1970er Jahren für die so genannte Dünnschichttechnologie genutzt (**Bild 2**). Die Dünnschichttechnologie zielt hauptsächlich auf die Herstellung von Leiterplatten der Elektronik ab, bei denen zwar die Anzahl der Schichten gering ist, diese jedoch in der Regel aus verschiedenen Materialien zusammengesetzt sind. Vorzugsweise geht es hierbei um die Herstellung von halbleitenden, metallischen oder dielektrischen Schichten, die üblicherweise dünner als $1\text{ }\mu\text{m}$ sind. Diese werden aus der Gasphase durch eine chemische Reaktion (**CVD, chemical vapor deposition**) oder aus der Dampfphase (**PVD, physical vapor deposition**) sowie der ionisierten Phase durch einen physikalischen Vorgang auf einem Trägermedium (Substrat) aufgebracht. Zur Strukturierung der Schichten können Laserbearbeitung, Ionenstrahlbearbeitung oder fotolithografische Maskentechnik eingesetzt werden.

Das Wirkprinzip von CVD beruht auf der chemischen Reaktion diffundierender Gasmoleküle auf der erhitzten Oberfläche eines Substrats. Hierbei werden auch feine Vertiefungen gleichmäßig beschichtet, so dass ein konformes Auftragen an 3D-Strukturen möglich ist.

Zu **CVD** gehören die aus der Gasphase heraus wirkenden Epitaxieverfahren (altgriech. epi – auf, taxis – Anordnung). Bei diesen werden auf einem

Substrat bei Prozesstemperaturen zwischen $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ Schichten mit gleichartiger kristalliner Gitterstruktur aufgebaut (**Bild 3**).

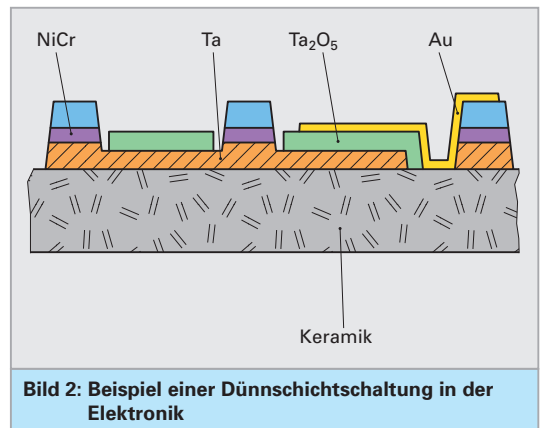


Bild 2: Beispiel einer Dünnschichtschaltung in der Elektronik

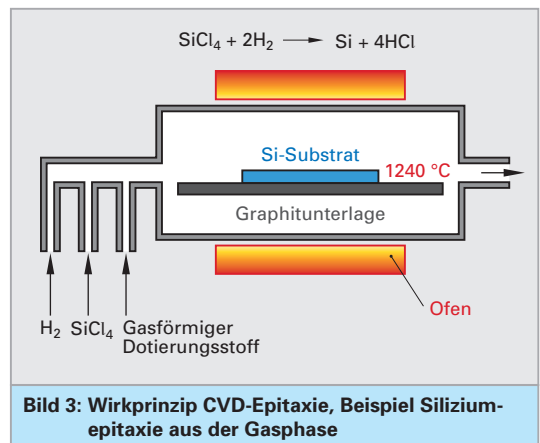


Bild 3: Wirkprinzip CVD-Epitaxie, Beispiel Silizium-epitaxie aus der Gasphase

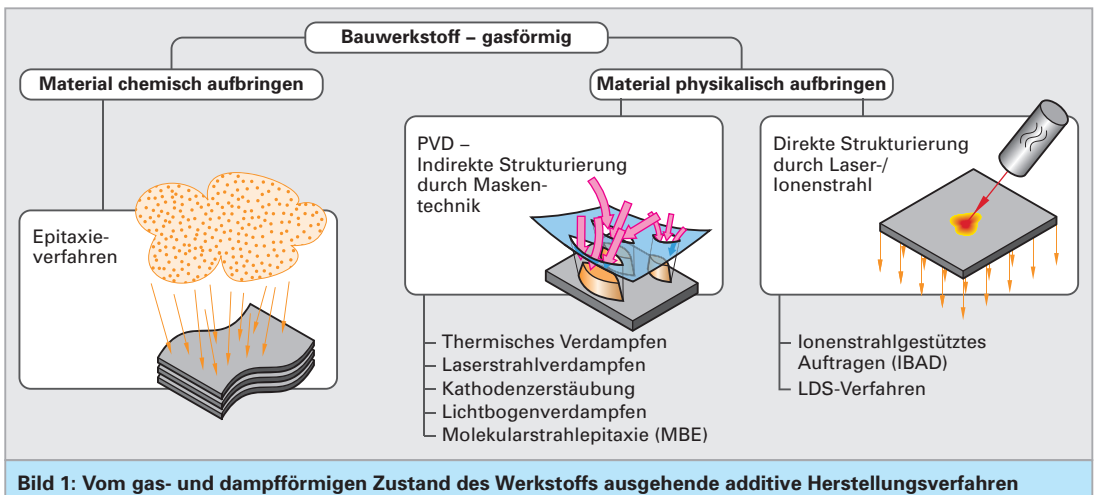


Bild 1: Vom gas- und dampfförmigen Zustand des Werkstoffs ausgehende additive Herstellungsverfahren

Bei den physikalisch wirkenden schichtbauenden Verfahren kann zwischen direktem und indirektem Strukturieren der erzeugten Schicht unterschieden werden. Bei Letzterem liegt das Beschichtungsmaterial als chemische Verbindung in Form eines Targets in einer Vakuumkammer vor. Dieses wird mit einem Laser- oder Ionenstrahl beschossen oder thermisch zum Verdampfen gebracht. Die so freigesetzten Moleküle schlagen sich auf dem Substrat nieder. Die Prozesstemperaturen liegen unterhalb von 600 °C.

Zu den physikalisch wirkenden Verfahren, die aus der Dampfphase heraus für additive Herstellungsvorgänge genutzt werden, gehören das

- thermische Verdampfen,
- das Laserstrahlverdampfen,
- das Lichtbogenverdampfen und
- die Katodenerstäubung (Sputtering).

Hierbei wird zunächst vom festen Aggregatzustand ausgehend in die Dampfphase übergeführt. Im Falle der Molekularstrahlepitaxie werden auf einem Substrat Schichten mit gleichartiger kristalliner Gitterstruktur aufgebaut (**Bild 1**). Beim „Sputtering“ können keramische Verbindungen abgeschieden werden (**Bild 2**).

Die Strukturierung der Oberflächen kann bei den genannten Verfahren durch fotolithografische Maskentechnik erfolgen.

Die direkte Strukturierung dünner Schichten ermöglicht das Ionenstrahl-gestützte Auftragen (IBAD Ion beam assisted deposition). Die kinetische Energie der Ionen beträgt dabei zwischen 10 eV und 1000 eV.

Die additive Laser-Direktstrukturierung nach dem LDS-Verfahren (LDS, laser direct structuring) ermöglicht die Herstellung von metallisierten Leiterbahnstrukturen auf 3D-Bauteiloberflächen aus Kunststoff (**Bild 3**). Dabei wird das Trägersubstrat aus Polymer zunächst mit einem Infrarotlaser selektiv für das Beschichten mit Kupfer aktiviert, worauf im folgenden weitere aus Nickel und Gold bestehende Schichten stromlos abgeschieden werden.

Additive Herstellungsprozesse können realisiert werden, indem der Werkstoff aus seiner Gasphase durch eine chemische Reaktion oder aus seiner Dampfphase durch einen physikalischen Prozess schichtweise oder punktwise im 3D-Bauraum auf einem Trägermedium aufgebracht und verfestigt wird.

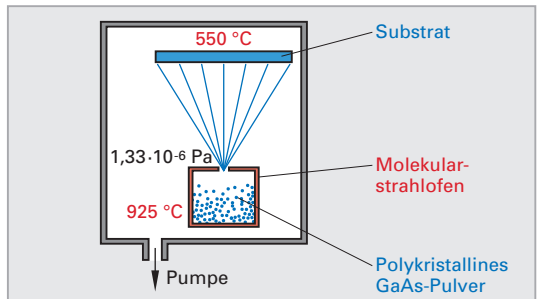


Bild 1: PVD, Wirkprinzip der Molekularstrahl-Epitaxie



Bild 2: PVD-Beschichten mit Sputter-Anlage

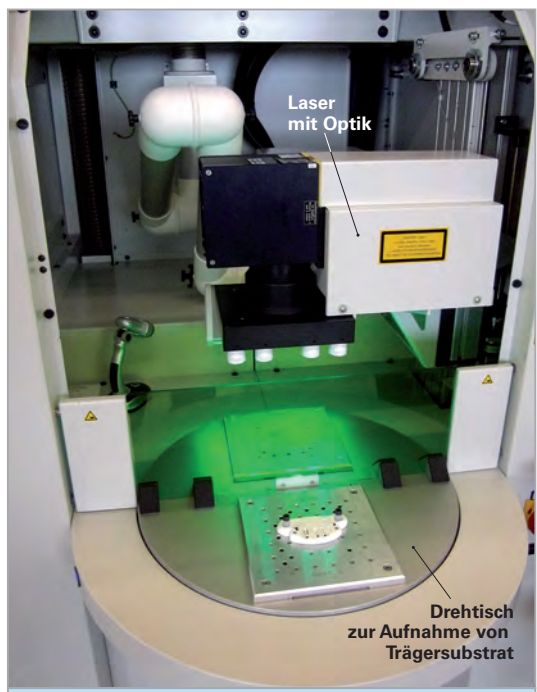


Bild 3: Blick in den Arbeitsraum einer LDS-Anlage

1.2.2 Flüssiger Ausgangszustand

In flüssiger Form vorliegender Werkstoff kann im additiv wirkenden Herstellungsvorgang nach verschiedenen Prinzipien aufgebracht und verfestigt werden (**Bild 1**). Es wird unterschieden zwischen

- den indirekt aufbauenden Verfahren, bei denen die Grundfläche des Bauraums ebenenweise vollständig benetzt und dann selektiv verfestigt wird,
- den direkt aufbauenden Verfahren, bei denen diese Grundfläche direkt und selektiv benetzt und danach vollständig verfestigt wird, und
- den Verfahren, bei denen das Bauvolumen nicht in 2 1/2-D-Technik sondern dreidimensional verfestigt wird. Letzteres ist bislang nur ansatzweise verwirklicht, z. B. durch Anwendung sich räumlich schneidender Laserstrahlen oder durch holografische Belichtung.

Die Verfestigung der flüssigen oder der pastenförmigen Materialien erfolgt durch Polymerisation, bei welcher in einer chemischen Reaktion ungesättigte, aus kleinen Molekülen bestehende Kohlenwasserstoffverbindungen, sogenannte Monomere, sich zu langen Molekülketten, Polymeren, verbinden und sich bei dieser Vernetzung verfestigen. Dieser Vorgang wird durch Zuführung von Energie in Form von Licht oder Wärme initiiert.

In den zuerst genannten Verfahren wird die Flüssigkeitsschicht durch einen mechanisch oder hydraulisch wirkenden Schieber flächig aufgetragen. Im folgenden Prozessschritt kann dann die Polymerisation selektiv eingeleitet werden, in-

dem eine Volumenschnittebene nach der anderen in 2D-Bahnen von einem Laserstrahl verfestigt wird (*Stereolithographie – SL, Bild 2*), in einem einzigen Verfahrensvorgang mit einer Zeile von feinfokussierten UV-Lichtpunkten überstrichen wird (*Micro Light Switching – MLS*) oder über eine dynamisch erzeugte Fotomaske auf einen Schlag belichtet wird (*Digital Light Processing – DLP, Bild 3*).

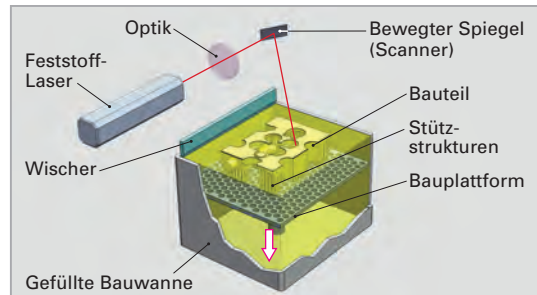


Bild 2: SL-Verfahren

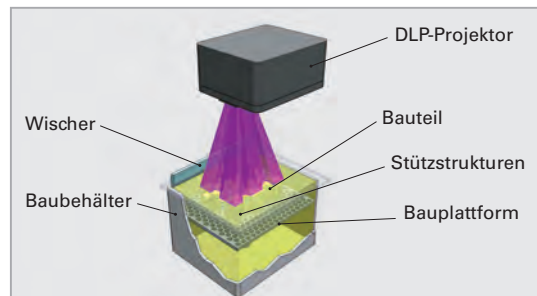


Bild 3: DLP-Verfahren

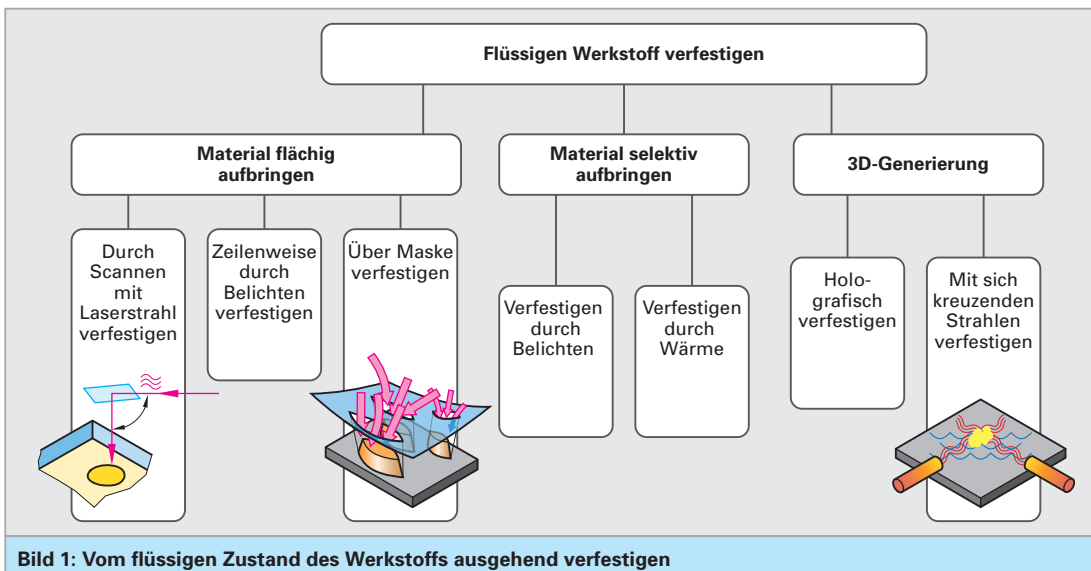


Bild 1: Vom flüssigen Zustand des Werkstoffs ausgehend verfestigen

In den selektiv benetzenden Verfahren wird das flüssige Baumaterial auf die zu verfestigenden Bereiche des jeweiligen Volumenschnitts durch hin- und herfahrende Düsenköpfe aufgebracht (Drop on Demand, DoD). Hierbei wird das Baumaterial im Druckkopf thermisch verflüssigt, durch Wärmeabfuhr auf dem Bauteil verfestigt und durch Belichten auspolymerisiert (**Bild 1**).

Additive Herstellungsprozesse können realisiert werden, indem der Werkstoff im flüssigen Zustand schichtweise oder entlang einer 3D-Bahn auf einem Trägermedium aufgebracht und verfestigt wird.

1.2.3 Fester Ausgangszustand

Bei den auf festen Baumaterialien basierenden Wirkprinzipien für eine Additive Fertigung liegt der Werkstoff in Draht- oder Strangform, als Laminat bzw. Blech oder in Form von Pulvern vor. Bei festen Materialien ist die größte Vielfalt für Anwendungen additiv wirkender Verfahren möglich, da sowohl Kunststoffe als auch unterschiedlichste Metalle und Metalllegierungen, aber auch mineralische Werkstoffe wie Sande, Keramiken bis hin zu Kompositwerkstoffen eingesetzt werden können (**Bild 2**).

Auch gibt es bei festen AM-Materialien, verglichen mit den flüssigen, eine größere Bandbreite bezüglich Materialkosten, Materialdurchsatz und Materialeffizienz. Etliche dieser Verfahren, wie z. B. LS, FLM und 3DP, können preisgünstige Serienmaterialien verarbeiten. Die Materialeffizienz bezieht sich auf die Verwertungsrate des eingesetzten Baumaterials. Sie kann zwischen 10 % und 90 % liegen. Der Materialdurchsatz und damit die Baugeschwindigkeit kann bei WAAM (Wire and Arc AM) mehrere kg/h betragen.

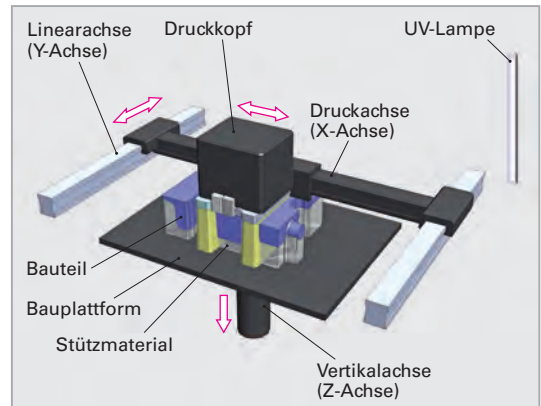


Bild 1: DoD-Verfahren (material jetting)

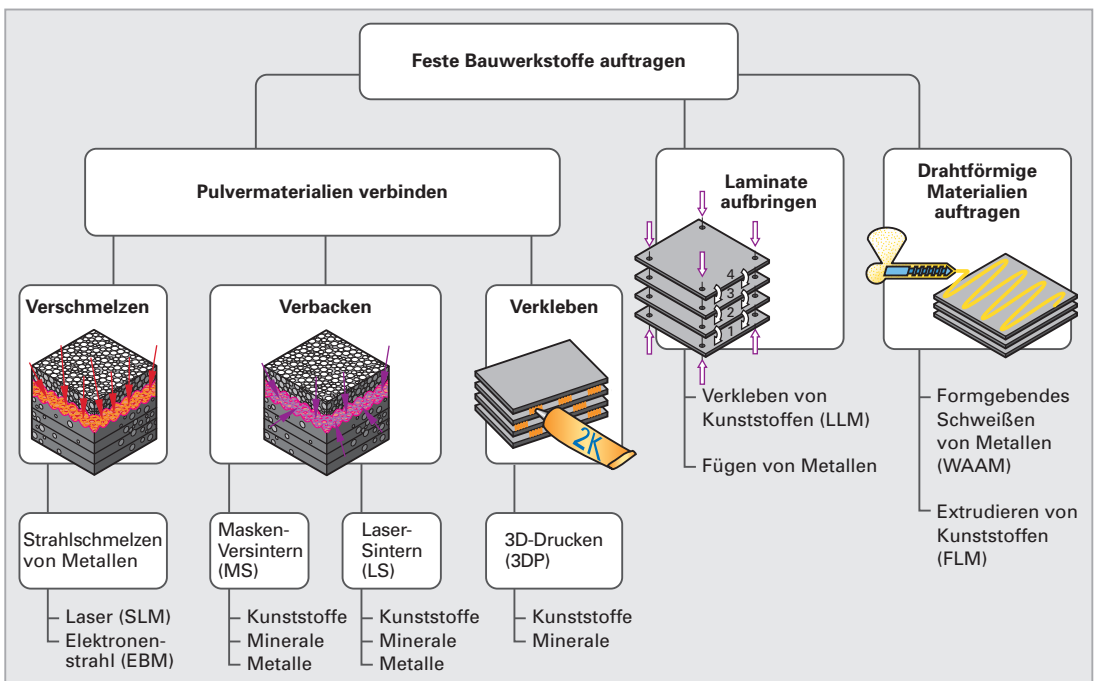


Bild 2: Vom festen Zustand des Werkstoffs ausgehend auftragen

Additive Herstellungsprozesse können realisiert werden, indem der Werkstoff im festen Zustand schichtweise auf einem Trägermedium aufgebracht und verfestigt wird. Hierfür werden Werkstoffe aus Kunststoffen, Metallen und Mineralen eingesetzt. Das Baumaterial kann in Drahtform, als Laminat oder als Pulver vorliegen. Die Verbindung kann durch Verkleben, Verbacken oder Verschmelzen erfolgen.

1.2.3.1 Drahtförmige Materialien

Draht- oder strangförmige Baumaterialien für Additive Fertigungsverfahren bestehen üblicherweise aus Kunststoffen, die durch erhitzte Düsen extrudiert werden und in zeilenförmigen Bahnen Schicht für Schicht das 3D-Teil erzeugen (**Bild 1**).

Die so aufgebauten Teile erhalten ihre Stabilität durch Aufschmelzen auf bereits gefertigte Schichten. Diese können vom selben Materialtyp sein, mit entsprechenden Sollbruchstellen, wenn es sich um Stützstrukturen für überhängende Partien des Bauteils handelt. Eine andere Realisierungsmöglichkeit für Stützstrukturen besteht darin, dass man hierfür ein zweites Material einsetzt, das im Wärmebad oder in einem Ätzbad gelöst werden kann. Dies erfordert höheren technischen Aufwand, da mit mehreren Extrusionsköpfen gearbeitet werden muss.

Metallische Drähte werden beim sogenannten formgebenden Auftragsschweißen eingesetzt (WAAM-Verfahren: Wire + Arc Additive Manufacturing).

Die auf dem Extrudieren von Kunststoffen beruhenden Verfahren werden unter dem Begriff *Fused Layer Modeling* (FLM) geführt.

1.2.3.2 Lamine

Lamine bieten eine hohe Flexibilität bezüglich des Einsatzes von Werkstoffen für den generativen Herstellungsprozess. Es können Kunststofffolien, Papiere, Metallbleche aber auch Kompositmaterialien genutzt werden. Die aufeinander gesetzten Schichten können verklebt aber auch, wie im metallischen Fall, verstiftet oder ultraschallgeschweißt (UC – ultrasonic consolidation) werden. Die entsprechenden Verfahren werden mit *Layer Laminated Manufacturing* (LLM) bezeichnet.

Bei aus Laminat hergestellten Bauteilen kann die natürliche Orientierung der Bauschichten beispielsweise für die Realisierung von flexiblen Bänderscharnieren vorteilhaft genutzt werden (**Bild 2**).

1.2.3.3 Pulver

Pulverförmige Baumaterialien sind inzwischen in einer großen Vielfalt auf **metallischer, mineralischer** und **organischer Basis** verfügbar. Die aufeinander aufgetragenen Schichten können durch

- Verkleben,
- Verbacken oder
- Verschmelzen

miteinander verbunden werden.

Je nachdem, ob eine oder mehrere Materialkomponenten zum Bindungsvorgang beitragen, spricht man von einem direkten oder einem indirekten Prozess. In Bild 2, vorhergehende Seite sind die Verfahren gegenübergestellt.

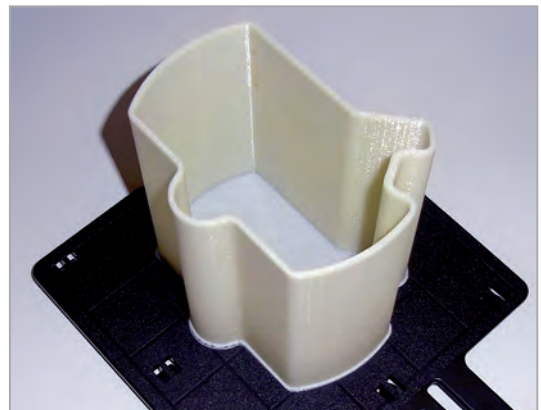


Bild 1: Im FLM-Verfahren hergestelltes Bauteil

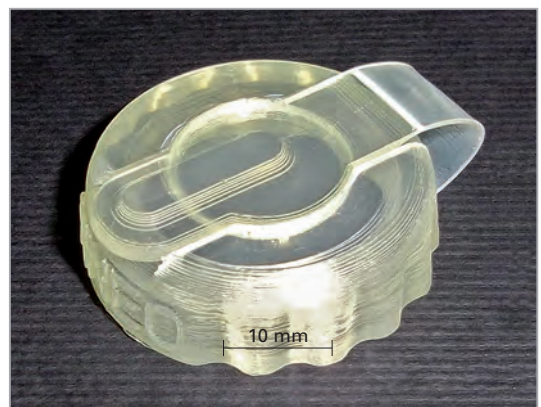


Bild 2: Im LLM-Verfahren hergestelltes Anschauungsmodell

Beim **pulververarbeitenden 3D-Druckverfahren** (3D-Printing – 3DP) wird ein flüssiger Binder mittels Düsenkopf selektiv auf einen Pulverwerkstoff gedruckt und so das Modell Schicht für Schicht aufgebaut. Mehrere Modelle können hierbei neben- und übereinander im Pulverbett liegen und benötigen daher keine Stützgeometrie (**Bild 1**). Als Werkstoffe kommen Kunststoffe und Minerale zum Einsatz.

Der Bauprozess beim **Laser-Sintern** (LS), auch als *selektives Lasersintern* (SLS – Selective Laser Sintering) bezeichnet, erfolgt wie allen additiven Verfahren in Schichten (**Bild 2**). Die einzelnen Körnchen des Baumaterials bestehen aus Kunststoff (**Bild 3**) oder aus polymerummanteltem Glas, Sand oder Metall. Die Körnchen verschmelzen partiell (verbacken) durch den Laserstrahl und halten das Materialgefüge zusammen. Im Bauprozess ungenutztes Material kann in einer Siebstation aufbereitet werden (**Bild 3**).

Beim **Masken-Sintern** (MS), auch selektives Maskensintern (SMS), wird die Pulverschicht über eine jeweils neu erzeugte Tonermaske flächig mit Infrarotlicht bestrahlt und Kunststoffpulver auf diese Weise selektiv verfestigt. Beide Verfahren erzeugen somit die Verbindung gewissermaßen durch ein Verschmelzen der Polymerkörnchen (**Bild 4**).

Kunststoffpulver verarbeitende AM-Verfahren sind Lasersintern, Maskensintern, Extrudieren und Pulverdruck-Polymerisation (**Bild 1, folgende Seite**). Alternativ zu Kunststoffen können auch beliebige anorganische, mineralische Materialien im AM-Prozess extrudiert werden, sofern diese in einen pastösen Zustand versetzbar sind.

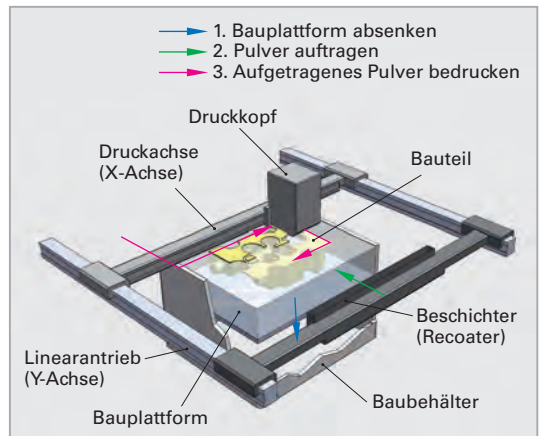


Bild 1: 3DP-Verfahren

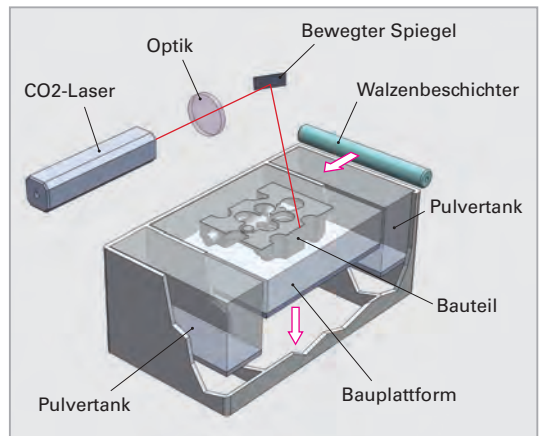


Bild 2: Lasersinter-Verfahren

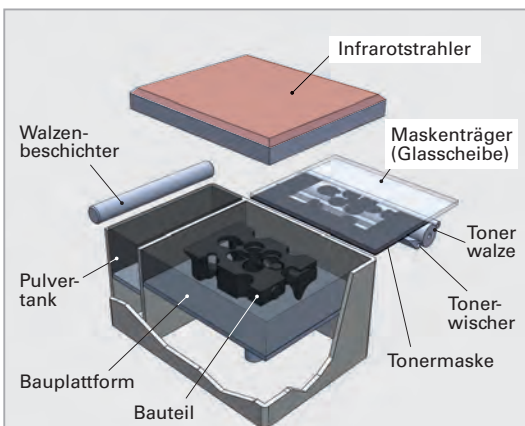


Bild 4: Maskensintern



Bild 3: Kunststoffpulveraufbereitung in Siebstation

Beim **Pulverbett-Strahlschmelzen** (Laser Beam Melting, Electron Beam Melting, Übersicht in **Bild 2**) können verschiedene Bindungsmechanismen realisiert werden. Die Porosität des verfestigten Materials hängt vom Umfang der zugeführten Energie ab. Es kann eine grobe Einteilung je nach Verwendung von Laser- oder Elektronenstrahl zum Verfestigen des Metallpulvers vorgenommen werden. Bei den laserbasierten Systemen wird mit magneto-mechanischer Strahlablenkung¹ (schwenkbare Spiegel) gearbeitet.

Das LMD-Verfahren (Laser Metal Deposition – auch Laser-Cladding) ermöglicht im Gegensatz zu den üblichen, pulverbettbasierten Schichtbauverfahren einen Aufbau durch Abfahren gekrümmter Flächen. Das Metallpulver wird über Düsen aufgestrahlt und im Laserfokus verschmolzen.

Metallpulverbettbasierte AM-Verfahren ermöglichen das Herstellen sehr dünner Schichtdicken (20 µm) und feinsten Strukturen. Nachteilig sind die relativ niedrigen Auftragsraten von ca. 0,01 kg/h und die Begrenzung der Arbeitsfläche wegen Laserauslenkung und Bauraumkapselung. Bei pulverstrahlbasierten Verfahren liegt die Auftragsrate um eine Größenordnung darüber (ca. 0,1 kg/h), die realisierbaren Bauschichtstärken betragen jedoch 0,1 bis 1 mm. Der Bauraum unterliegt keinen technologischen Beschränkungen.

Das EBM-Verfahren nutzt die magnetische Ablenkung von Elektronenstrahlen. Die Elektronen-

strahlablenkung ermöglicht größere Ablenkgeschwindigkeiten als die Laserstrahlablenkung.

¹ Diese Technik gibt es typischerweise bei den traditionellen elektro-mechanischen Messgeräten, den Galvanometern und bei den schnellaufzeichnenden Messschreibern, den Spiegelgalvanometern. So bezeichnet man diese Art der Laserstrahlablenkung auch galvanometrische Ablenkung.

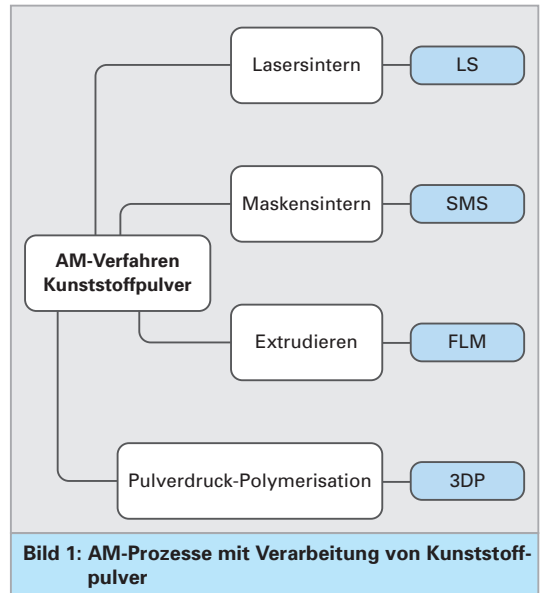


Bild 1: AM-Prozesse mit Verarbeitung von Kunststoffpulver

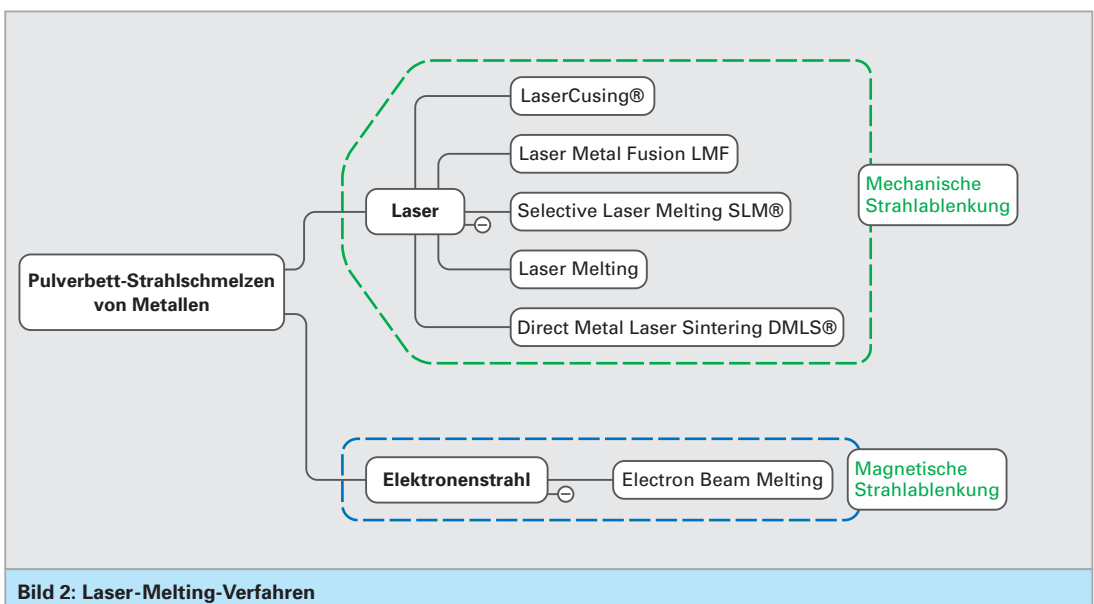


Bild 2: Laser-Melting-Verfahren

1.2.4 Standards

Die mittlerweile große Anzahl kommerzialisierter Schichtbauverfahren hat zu einer Vielzahl an Benennungen geführt. Zum einen konkurrieren Firmen mit verwandten AM-Prozessen aber hierfür unterschiedlichen, teils Trademark-geschützten Prozessbezeichnungen, zum anderen definieren nationale Fachgremien eigene Begriffsstandards. So sind in Deutschland die Benennungen von AM-Verfahren gemäß der VDI-Richtlinie 3405 ver-

breitet und entsprechend wird in diesem Buch ihre Verwendung auch etablierten Firmenbezeichnungen vorgezogen.

Die Harmonisierung der einschlägigen Begriffe wird seit 2013 durch Zusammenarbeit der weltweit wohl bedeutendsten Normungskomitees, ISO/TC 261 und ASTM F42 in Angriff genommen.

Tabelle 1, folgende Seite stellt die gemäß ASTM F2792-12a standardisierten Begriffe denen der VDI 3405 Richtlinie und den entsprechenden verbreitenden Firmenbezeichnungen gegenüber.

VDI 3405 beschreibt die kommerziell etablierten AM-Verfahren und listet deren generischen Begriffe mit ihren Abkürzungen auf.

Firmeneigene Bezeichnungen für Varianten des gleichen Prozesses sind in der Übersicht in einer eigenen Spalte gegenübergestellt.

ASTM F2792-12a definiert eine allgemeine Standardterminologie für AM-Technologien und unterteilt hierbei in sieben Prozesskategorien, losgelöst von kommerziellen Realisierungen und deren Prozessvarianten:

vat photopolymerization – AM-Prozess, bei welchem in einem Behälter flüssiges Baumaterial durch Photopolymerisation selektiv ausgehärtet wird,

material jetting – AM-Prozess, bei welchem Tröpfchen des Baumaterials selektiv aufgetragen werden,

binder jetting – AM-Prozess, bei welchem ein flüssiges Bindemittel selektiv aufgetragen wird, um ein Pulver zu verfestigen,

material extrusion – AM-Prozess, bei welchem Material durch eine Düse oder Öffnung selektiv verteilt wird,

powder bed fusion – AM-Prozess, bei welchem durch eingebrachte thermische Energie Bereiche in einem Pulverbett selektiv verschmolzen werden,

sheet lamination – AM-Prozess, bei welchem Schichten eines Materials flächig verbunden werden, um ein Objekt zu formen,

directed energy deposition – AM-Prozess, bei welchem gebündelte thermische Energie dazu genutzt wird, um Materialien, dort wo sie aufgebracht werden, durch Verschmelzen zu verbinden.

In der Übersicht sind diejenigen Verfahren, bei denen gebündelte thermische Energie zugeführt wird, unterteilt nach Zuführung des Baumaterials in Pulver- oder Drahtform.

Obwohl entsprechende Verfahren kommerzialisiert sind, ist die ASTM-Kategorie „*directed energy deposition*“ in VDI 3405 nicht aufgenommen.

Weder ASTM F2792-12a noch VDI 3405 berücksichtigt AM-Prozesse, die mechanische Energie für den schichtweisen, selektiven Aufbau von Objekten nutzen. Dieser Kategorie ist der Cold-Spray-Prozess zuzuordnen, als *MPA-Verfahren* (Metall-Pulver-Auftragsverfahren) kommerzialisiert (*Hermle*).

Im Gegensatz zu VDI 3405 wird der Begriff *Lasersintern* (LS) von ASTM als historisch angesehen und nicht mehr verwendet, da die entsprechenden AM-Prozesse die Pulverpartikel voll oder teilweise aufschmelzen, während die traditionellen Sinterverfahren mit Form und Druck bzw. Wärmezufuhr arbeiten.

Aerosol-jet-printing und *Inkjet-printing* sind kommerzialisierte Prozesse.

Neben der Begriffsbildung ist die Standardisierung von AM-Datenformaten, von AM-Materialien und von AM-Testverfahren Arbeitsziel internationaler Normungsgremien.

Insbesondere sind die Prozessfenster pulverbasierter AM-Prozesse sehr eng an die Eigenschaften der eingesetzten Pulver geknüpft, wobei eine Vielzahl von Einflussgrößen auftreten, wie z. B. Dichte, chemische Zusammensetzung, Fließverhalten, Feuchtigkeitsgehalt, Korngrößenverteilung, Korngeometrie, u. a..

Um *Rapid Manufacturing*, d. h. die Herstellung von Funktions- und Serienteilen mit gleichbleibenden Eigenschaften zu ermöglichen, ist Chargetreue der Pulverlieferungen vorauszusetzen.

Die entsprechende Charakterisierung von metallischen Pulvern und die Spezifikation hieraus gefertigter AM-Bauteile beschränkt sich bislang auf Ti6Al4V (ASTM F2924-14/ASTM F3001-14), Inconel 718 (ASTM F3056-14e1) und AlSi10Mg (VDI 3405 Blatt 2.1).

Die Beschreibung von Testmethoden zur Charakterisierung von AM-Pulvern ist Inhalt von ASTM F3049-14. Der Standard definiert sich als Einstieg in künftig zu spezifizierende Tests individueller Eigenschaften pulverbasiert gefertigter AM-Bauteile.

ASTM F3122-14 ist als Leitfaden zu bestehenden Standards, die zur Bestimmung spezifischer mechanischer Eigenschaften von im AM-Verfahren hergestellten Bauteilen dienen, gedacht. Bezug genommen wird u. a. auf Materialanisotropie, Porosität, Testumgebung und Präparation des Prüflings.

Die Richtlinie VDI 3405 Blatt 2 beschreibt mögliche Prüfabläufe für additiv hergestellte Metallteile. Hierfür vorhandene Normen sind zusammengetragen. Zielsetzung ist die Qualifizierung additiver Herstellungsverfahren.

ISO/ASTM 52915 definiert ein Verfahrens-unabhängigen Datenformat zum Austausch von AM-Informationen. Das Additive Manufacturing File Format (AMF) kann von beliebigen derzeit verfügbaren AM-Verfahren genutzt werden. Es können Verbundmaterialien, gradierte oder poröse Materialstrukturen, Farbinformationen, Transparenz oder Texturen abgebildet werden.

Tabelle 1: Begriffsnormierung der AM-Prozesse			
ASTM F2792-12a (2012)	VDI 3405 (Dez. 2014)	Firmenbezeichnung/ <i>Firma</i>	
Vat Photopolymerization	SL, Stereolithografie		
	DLP, Digital Light Processing		
Material Jetting	MJM, Multi-Jet Modelling		
	PJM, Poly-Jet Modelling		
		Aerosol-jet printing <i>Optomec</i> Inkjet printing <i>Dimatix</i>	
Binder Jetting	3DP, 3D-Printing	Multi Jet Fusion™ <i>HP</i>	ExOne®-Binder Jetting
Material Extrusion	FLM, Fused-Layer Modelling	FDM® <i>Stratasys</i>	Dispensing <i>EnvisionTEC</i>
Powder Bed Fusion	TTS, Thermotransfer-Sintern	SMS	SHS™ <i>Blueprinter</i>
	LS, Laser-Sintern	LS <i>EOS</i>	SLS® <i>3D Systems</i>
	LBM, Laser-Strahlschmelzen	DMP <i>3D Systems</i> DMLS <i>EOS</i> LMF <i>Trumpf</i>	LaserCusing® <i>ConceptLaser</i> Laser Melting <i>Renishaw</i> SLM® <i>SLM Solutions</i>
	EBM, Elektronen-Strahl-schmelzen	EBM® <i>ARCAM</i>	
Sheet Lamination	LLM, Layer Laminated Manufacturing	LOM™	
Directed Energy Deposition (DED)		EBAM™ <i>Sciaky</i>	WAAM <i>BAE systems</i>
		DMD® <i>DM3D Technology</i> DMT <i>InssTek</i>	LENS <i>Optomec</i> LMD <i>Trumpf, BeAM</i>

1.3 Stützstrukturen

Stützstrukturen (Supports¹) verhindern als zusätzliches Baumaterial ein Absinken von Bauteilen im Bauraum oder deren Verzug. Die Gefahr für Absinken und Verzug ist besonders groß, solange die Bauteile noch nicht ihre Endfestigkeit erreicht haben. Ein Verzug (Curling) kann durch ungleichmäßiges Abkühlen oder ungleichmäßiges Abtrocknen bzw. Abbinden eines Bauteils entstehen. Der Verzug bedeutet in erster Linie den Verlust der Maßhaltigkeit eines Bauteils (**Bild 1**).

Das Absinken eines Bauteils oder eines Bauteilabschnitts kann zu Formabweichung oder im schlimmsten Fall zu einer Trennschicht führen. Eine Trennschicht bedeutet die Unterbrechung des Schichtverbunds und damit auch des Bauteils (**Bild 1**).

Die Stützstrukturen binden in der Regel direkt am Bauteil an. Nach Fertigstellung des Bauprozesses müssen die Stützstrukturen im Postprozess entfernt werden (**Bild 2**).

Stützstrukturen werden vorwiegend bei Verfahren eingesetzt, bei denen das Baumaterial während des Auftrags flüssig oder fließfähig ist. Bei pulververarbeitenden Systemen stützt in erster Linie das ungebundene Pulver die Bauteile. Nimmt die Bauteildichte während der Herstellung stark zu, können die Bauteile im Pulverbett absinken. Deshalb können auch hier Stützstrukturen zur Abstützung eingesetzt werden. Bei der thermischen Herstellung großer Bauteile oder bei Bauteilen mit ungünstigen Querschnittsprüngen aus Pulvermaterial können Stützstrukturen einem Verzug vorbeugen. Bei metallpulverbasierten Prozessen kann über die Stützstruktur Wärme in die Bauplattform abgeführt werden. Ein temperaturbedingter Verzug vermindert sich.

Bei vielen Verfahren gehen die Bauteile während des Bauvorgangs eine feste Verbindung mit der Bauplattform ein (**Bild 3**). Zur besseren Entfernung der Bauteile besteht die Anbindung zwischen den Bauteilen und der Bauplattform in der Regel aus einer **Stützkonstruktion**.

Die Baudaten der Stützstrukturen werden im Preprozess automatisch von der Maschinensoftware erstellt und können vom Bediener optimiert werden.

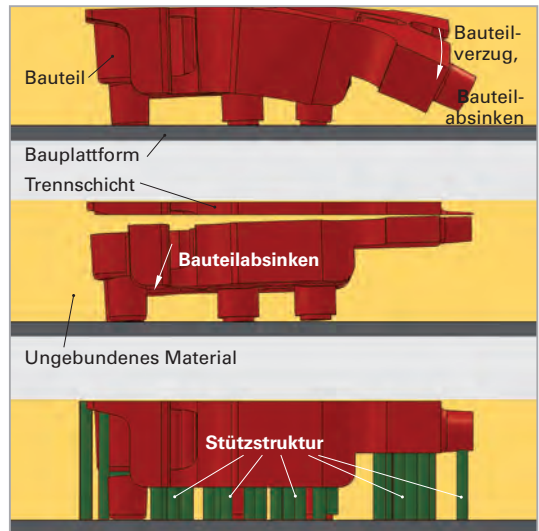


Bild 1: Baufehler bei Teilen ohne Stützstruktur

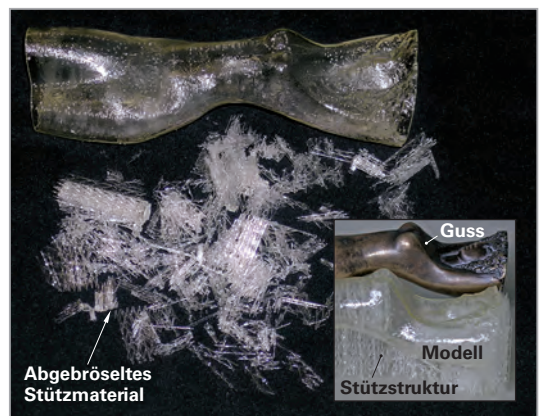


Bild 2: Entfernen der Stützstruktur

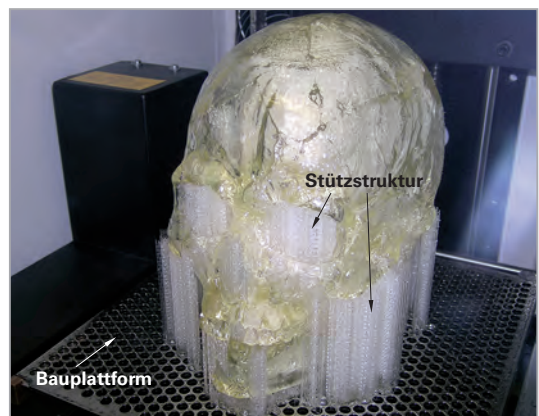


Bild 3: Feste Verbindungen mit der Bauteilplattform

¹ engl. support = Stütze, Träger, Aussteifung, Bettung