



Leseprobe

Andreas Gebhardt

3D-Drucken

Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM)

ISBN (Buch): 978-3-446-44672-4

ISBN (E-Book): 978-3-446-44845-2

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44672-4>

sowie im Buchhandel.



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Die Internet-Plattform für Entscheider!

Exklusiv: Das Online-Archiv der Zeitschrift Kunststoffe!

Richtungsweisend: Fach- und Brancheninformationen
stets top-aktuell!

Informativ: News, wichtige Termine, Bookshop, neue
Produkte und der Stellenmarkt der Kunststoffindustrie

Kunststoffe.de

Andreas Gebhardt
Julia Kessler
Laura Thurn

3D-Drucken

Grundlagen und Anwendungen
des Additive Manufacturing (AM)

2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage

HANSER

Die Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Andreas Gebhardt

Geschäftsführer der CP – Centrum für Prototypenbau GmbH, Erkelenz/Düsseldorf

Professor an der Fachhochschule Aachen

Lehrgebiet: Hochleistungsverfahren der Fertigungstechnik und Additive Manufacturing

Julia Kessler, M. Eng.

Geschäftsführerin der IwF GmbH, Institut für werkzeuglose Fertigung, Aachen

Doktorandin an der Fachhochschule Aachen

Lehrgebiet: Hochleistungsverfahren der Fertigungstechnik und Additive Manufacturing

Laura Thurn, M. Eng.

Doktorandin an der Fachhochschule Aachen

Lehrgebiet: Hochleistungsverfahren der Fertigungstechnik und Additive Manufacturing

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Darstellungen und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Darstellungen oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2016 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Herstellung: Jörg Strohbach

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Satz: Manuela Treindl, Fürth

Druck und Bindung: Kösel, Krugzell

Printed in Germany

ISBN: 978-3-446-44672-4

E-Book-ISBN: 978-3-446-44845-2

Vorwort

Rapid Prototyping, Additive Fertigungsverfahren, 3D-Drucken, und die englischen Varianten Additive Manufacturing, 3D Printing, Desktop Manufacturing, sind identische Bezeichnung für die Technologie der Schichtbauverfahren und ihre Anwendung.

Die unterschiedlichen Begriffe bezeichnen jene neuen Fertigungsverfahren, denen nachgesagt wird, sie begründeten eine weitere industrielle Revolution. Sie sind geeignet die Produktentwicklung durch schnelle Verfügbarkeit komplexer Prototypen zu beschleunigen und in ihrer Qualität zu verbessern. Sie versetzen uns aber auch in die Lage, direkt und losgrößenunabhängig Endprodukte herzustellen. Damit markieren sie tatsächlich eine Revolution der Fertigungstechnik: Die Wandlung von einer Fertigungstechnologie zur Herstellung großer Serien von gleichen Teilen hin zu einer Serienfertigung von unterschiedlichen Teilen, seien es Einzelteile, beliebige Chargen oder auch Mischungen daraus.

Das 3D-Drucken ist in allen Branchen einsetzbar. Jeder, der mit Konstruktion und Fertigung, aber auch mit strategischer Planung zu tun hat, sollte daher über diese Technologie so viel wissen, dass eine qualifizierte Bewertung und Auswahl erfolgen kann.

Dieses Buch vermittelt in knapper, der Praxis angemessener Form die Grundlagen der Verfahren und zeigt exemplarische Anwendungen. In die Betrachtung werden alle heute verfügbaren Verfahren aufgrund einer Systematik einbezogen, die auch die Einordnung und Bewertung zukünftiger Verfahren ermöglicht. Die große und schnell wachsende Vielfalt unterschiedlicher Maschinen für additive Herstellungsverfahren werden klassifiziert.

Neben den Verfahren werden neue Arbeitsformen diskutiert, die sich aus der digitalen ortsunabhängigen Fertigung ergeben und eine dezentrale Fertigung ermöglichen, die die heutige Produktionsorganisation gründlich verändern könnte.

Ein Glossar unterstützt die tägliche Arbeit mit dem 3D-Drucken und den schnellen Zugang.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Danksagung	VII
Über die Autoren	IX
1 Grundlagen der 3D-Druck-Technologie	1
1.1 Grundbegriffe und Definitionen	2
1.1.1 Additive Fertigungsverfahren	2
1.1.2 Prinzip der Schichtbauverfahren	3
1.2 Anwendungsebenen	6
1.2.1 Direkte Prozesse	8
1.2.1.1 Rapid Prototyping	8
1.2.1.2 Rapid Manufacturing	12
1.2.1.3 Rapid Tooling	14
1.2.2 Indirekte Prozesse	19
1.2.2.1 Indirect Prototyping	19
1.2.2.2 Indirect Tooling	22
1.2.2.3 Indirect Manufacturing	25
1.3 Maschinenklassen für die additive Fertigung	27
1.3.1 Generische Bezeichnung für AM-Maschinen	28
1.3.2 Maschinenklassen und Bauteileigenschaften	30
1.4 Schlussfolgerungen	31
1.5 Fragen	32
2 Additive Fertigungsverfahren/3D-Drucken	35
2.1 Direkte additive Verfahren	35
2.1.1 Polymerisation	38
2.1.1.1 Laser-Stereolithographie (LS)	39
2.1.1.2 Polymerdruckverfahren und Thermojet-Drucken (Polymerjetting)	42

2.1.1.3	Digital Light Processing/Lampen-Masken-Verfahren	44
2.1.1.4	Mikro-Stereolithographie	45
2.1.2	Sintern und Schmelzen	45
2.1.2.1	Lasersintern/Selektives Lasersintern (LS – SLS)	46
2.1.2.2	Laserschmelzen/Selektives Laserschmelzen (SLM)	49
2.1.2.3	Elektronenstrahl-Schmelzen	51
2.1.3	Extrusion/Fused Layer Modeling	51
2.1.4	Pulver-Binder-Verfahren	55
2.1.4.1	3D Printer – 3D Systems/Z-Corporation	55
2.1.4.2	Metall und Formsand Printer – ExOne	58
2.1.4.3	3D-Drucksystem – Voxeljet	59
2.1.5	Layer Laminate Manufacturing (LLM)	60
2.1.5.1	Laminated Object Manufacturing (LOM)	60
2.1.5.2	Selective Deposition Lamination (SDL)	62
2.1.5.3	LLM Maschinen für Metallteile	63
2.1.6	Hybridverfahren	64
2.1.6.1	Metallpulverauftragsverfahren (MPA)	64
2.1.6.2	Direct Metal Deposition (DMD)	65
2.1.6.3	Extrudieren und Fräsen – Big Area Additive Manufacturing (BAAM)	66
2.1.7	Weitere Verfahren	67
2.1.7.1	Aerosolprinting	67
2.1.7.2	Bioplotter	69
2.2	Indirekte Verfahren – Folgeprozesse	69
2.3	Schlussfolgerung	71
2.4	Fragen	71
3	Die additive Prozesskette und Maschinen für die Fertigung	75
3.1	Datenfluss und Prozessketten	75
3.1.1	Allgemeine AM-Prozesskette	75
3.1.1.1	Prozesskette Rapid Prototyping	77
3.1.1.2	Prozesskette Rapid Manufacturing	79
3.1.2	Datenstrukturen und Fehlerbehebung	80
3.2	Maschinen für die additive Fertigung	84
3.2.1	Personal Printer	85
3.2.1.1	Fabber – Do-it-yourself	86
3.2.1.2	Desktop Printer	88
3.2.2	Professional Printer	91
3.2.3	Production Printer	92
3.2.4	Industrial Printer	95
3.3	Schlussfolgerungen und Ausblick	98

3.4	Fragen.....	98
4	Anwendungen der additiven Fertigung	101
4.1	Automobilindustrie und Zulieferer	102
4.1.1	Automobilkomponenten – Interieur	102
4.1.2	Automobilkomponenten – Exterieur.....	105
4.2	Luftfahrtindustrie	107
4.3	Konsumgüter	109
4.4	Spielzeugindustrie	114
4.5	Kunst und Kunstgeschichte	116
4.6	Formenbau (Rapid Tooling)	119
4.7	Medizintechnik	121
4.8	Architektur und Landschaftsgestaltung.....	126
4.9	Verschiedene Anwendungen	131
4.9.1	Mathematische Funktionen	131
4.9.2	3D-Dekorationsobjekte und Ornamente	132
4.9.3	Aerodynamische und Freiformobjekte	132
4.10	Schlussfolgerungen.....	134
4.11	Fragen.....	134
5	Perspektiven und Strategien additiver Fertigung.....	139
5.1	Potenziale additiver Herstellungsverfahren	139
5.1.1	Komplexe Geometrien.....	141
5.1.2	Integrierte Geometrie	143
5.1.3	Integrierte Funktionalität.....	145
5.1.4	Multi-Material-Bauteile und Gradientenmaterialien	151
5.2	Strategien additiver Herstellungsverfahren	155
5.2.1	Individualisierte Massenfertigung	156
5.2.1.1	Einzelstücke und Kleinserienproduktion	156
5.2.1.2	Individualisierung.....	157
5.2.1.3	Personalisierung	160
5.2.2	Persönliche Produktion	164
5.2.3	Verteilte individualisierte Produktion	166
5.3	Schlussfolgerungen.....	166
5.4	Fragen.....	167
6	Materialien und Konstruktion	171
6.1	Materialien.....	172
6.1.1	Anisotrope Eigenschaften.....	174
6.1.2	Isotrope Grundmaterialien.....	176
6.1.2.1	Kunststoffe.....	177

6.1.2.2	Metalle	181
6.1.2.3	Keramische Materialien	183
6.1.2.4	Kompositwerkstoffe.....	184
6.1.2.5	Weitere Materialien.....	185
6.1.2.5.1	Beton.....	185
6.1.2.5.2	Carbon	185
6.1.2.5.3	Lebensmittel.....	185
6.1.3	Individuell zugeschnittene (graded) Werkstoffe und Kompositwerkstoffe.....	186
6.2	Konstruktion	187
6.2.1	Toleranzen – Vom digitalen Entwurf zum Objekt	188
6.2.2	Designfreiheit	188
6.2.3	Relative Passgenauigkeit	189
6.2.4	Flexible Bauteile, Gelenke, Clips	190
6.2.5	Lage und Positionierung der Bauteile im Bauraum.....	191
6.2.6	Bohrungen (Löcher), Spalte, Stifte und Wände	192
6.3	Auswahlkriterien und Prozessorganisation	195
6.4	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	196
6.5	Fragen.....	197
7	Glossar: Begriffe und Abkürzungen.....	199
8	Literatur	209
	Stichwortverzeichnis.....	213

2.1.2.1 Lasersintern/Selektives Lasersintern (LS – SLS)

Die Bezeichnung Lasersintern oder Selektives Lasersintern wird bevorzugt für Maschinen verwendet, die Kunststoffe verarbeiten. Hersteller und Vertreiber sind 3D Systems, Rock Hill, SC, USA und EOS GmbH, München, Deutschland.

Die Maschinen beider Hersteller sowie die Maschinen, die Metalle verarbeiten, sind sich sehr ähnlich. Sie bestehen aus einem Bauraum, der mit Pulver mit einer Korngröße (von ca. 20 μm bis ca. 50 μm gefüllt wird, und einem darüber angeordneten Laserscanner, der die x - y -Kontur erzeugt. Der Boden des Bauraums ist als verfahrbarer Kolben ausgebildet, der auf jede z -Ebene eingestellt werden kann (Bild 2.11). Die Oberfläche des Pulverbettes bildet die Baufläche, in der die aktuelle Schicht hergestellt wird. Der gesamte Bauraum ist beheizt, um die Laserleistung und Verzüge zu minimieren und wird zur Vermeidung von Oxidationsvorgängen vollständig mit Schutzgas gefüllt.

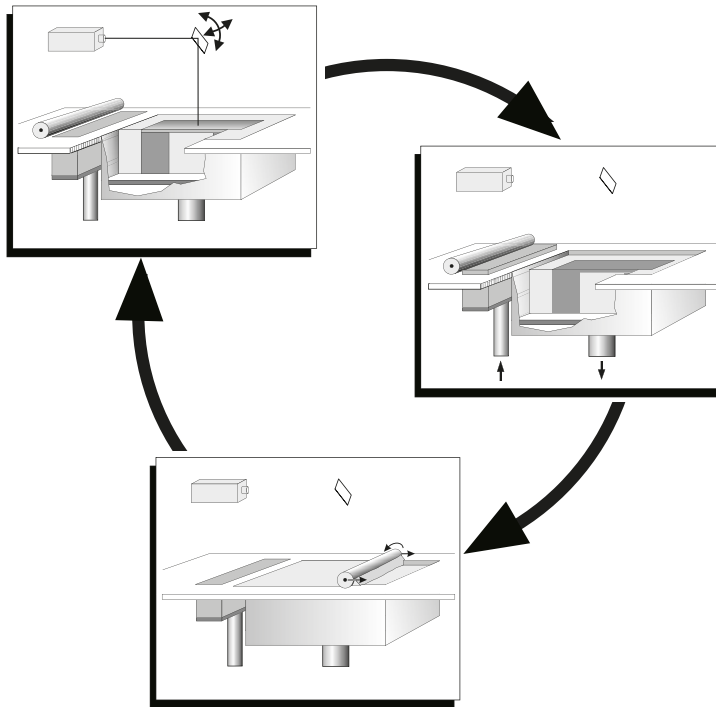


Bild 2.11 Lasersintern und Laserschmelzen, schematischer Ablauf; Aufschmelzen und Verfestigen einer einzelnen Schicht, Absenken der Bauplattform, Neubeschichten (im Uhrzeigersinn, beginnend oben links)²

² Eine 3D-Animation findet sich unter: www.rtejournal.de/filme/SLS-RTe.wmv/view

Der Laserstrahl konturiert jede Schicht. Die Konturdaten werden aus den Schnittdaten jeder Schicht im 3D-CAD-Modell gewonnen und vom Scanner gesteuert. Wo der Laserstrahl auf der Pulveroberfläche auftritt, werden die Partikel örtlich aufgeschmolzen. Der Prozess hängt vom Durchmesser des Laserstrahls und der Scan- oder Fortschrittsgeschwindigkeit ab. Während der Strahl weiterwandert, erstarrt das aufgeschmolzene Material infolge der Wärmeabfuhr durch Wärmeleitung in das umgebende Pulver. Dadurch wird eine feste Schicht erzeugt.

Nach der Verfestigung einer Schicht wird der Kolben am Boden des Bauraums um den Betrag einer Schichtdicke heruntergefahren, sodass das gesamte Pulverbett einschließlich des angearbeiteten Bauteils abgesenkt wird. Der entstehende Freiraum oberhalb des Pulverbetts wird mithilfe einer Rolle mit frischem Pulver gefüllt, das aus der angrenzenden Pulver-Vorratskammer stammt. Um das frische Pulver gleichmäßig zu verteilen, rotiert die Rolle entgegen ihrer Vorschubrichtung. Dieser Vorgang wird „Wiederbeschichtung“ (Recoating) genannt. Nach der Wiederbeschichtung beginnt der Bauprozess zur Herstellung der nächsten Schicht von neuem. Der ganze Vorgang wird Schicht für Schicht fortgesetzt, bis das Bauteil fertiggestellt ist. Meistens wird die oberste Schicht mithilfe einer abweichenden Scanstrategie hergestellt, um ihre Festigkeit zu erhöhen.

Nachdem die Fertigung abgeschlossen ist und die oberste Lage erzeugt wurde, wird das gesamte Bauteil samt dem es umgebenden Pulver mit einigen zusätzlichen Pulverlagen bedeckt. Dieser sogenannte Pulverkuchen muss abgekühlt werden, bevor das Bauteil aus dem umgebenden Pulver herausgenommen und entfernt werden kann. Der Abkühlvorgang kann in der Maschine erfolgen, eine Abkühlung in einer getrennten Kammer erlaubt jedoch den sofortigen Beginn eines neuen Bauvorgangs.

Sintern ermöglicht die Verwendung aller Materialarten wie Kunststoffe, Metalle und keramische Materialien. Die Maschinen sind grundsätzlich sehr ähnlich. Die Maschinen werden entweder durch Softwareanpassungen (und eventuell kleinere Hardwareänderungen) an die verschiedenen Materialien angepasst oder spezielle Versionen eines Maschinengrundtyps werden für die Verwendung einer bestimmten Materialart optimiert. In diesem Zusammenhang werden die Systeme zur Wiederbeschichtung speziell für die zur Verwendung kommenden Materialien angepasst, z. B. Rollensysteme für Kunststoffpulver sowie Trichtersysteme oder Füllschuhe für kunststoffbeschichteten Formsand. Für metallverarbeitende Systeme werden auch Wischersysteme verwendet.

Während Standard-Kunststoffmaterialien Polyamide des Typs PA 11 oder PA 12 sind, ahmen heutige Hochleistungsmaterialien die Eigenschaften von PC, ABS, PA (6.6) Kunststoffen nach und erzeugen Konstruktionselemente wie Filmscharniere und Schnapphaken. Das Hochtemperatursystem EOS 396 (2016) ist zurzeit das einzige am Markt erhältliche System, das auch Hochleistungskunststoffe (in diesem Fall PEEK) verarbeitet, und gibt damit den Trend vor.

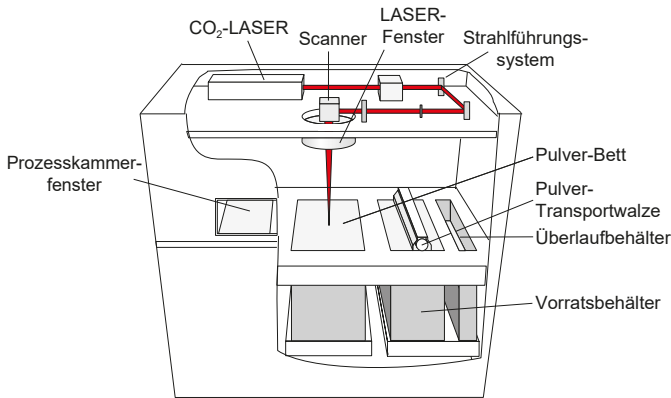


Bild 2.12 Prinzipieller Aufbau einer Sinteranlage von 3D-Systemen (links), Lasersinter Maschine EOSINT P 800 (rechts)
(Quelle EOS GmbH)

Für das Lasersintern sind ungefüllte oder mit sphärischen oder eiförmigen Glas-, Aluminium- oder Kohlenstoff-Partikeln gefüllte Materialien verfügbar, die deren Festigkeit und Temperaturbeständigkeit erhöhen. Sogar schwer entflammable Materialien sind erhältlich.

Die Entnahme des Bauteils aus dem Pulver (das sogenannte Ausbrechen, „Break Out“) wird üblicherweise von Hand durch Bürsten und Sandstrahlen mit geringem Druck ausgeführt. Halbautomatisch arbeitende sogenannte „Break Out“-Stationen erleichtern die Arbeit und markieren den Trend zu automatischer Reinigung. Metallische Bauteile müssen mechanisch von der Bauplattform und den Stützen getrennt werden, was zeitaufwendig ist und handwerkliche Fähigkeiten erfordert.

Kunststoffbauteile sind oft porös und müssen getränkt werden. Falls erforderlich, können sie einer Oberflächenbehandlung unterzogen, bzw. lackiert werden. Typischerweise sind metallische Bauteile dicht. Sie können in Abhängigkeit des Werkstoffs wie konventionell hergestellte bearbeitet werden, z. B. durch Schneiden oder Schweißen.

Gesinterte Kunststoffteile verfügen über Eigenschaften, die denen von Kunststoff-Spritzgussteilen nahekomen. Sie werden entweder als Prototypen (Bild 2.13, links) oder als (direkt hergestellte) Bauteile (auch Zielteile oder Serienteile genannt) (Bild 2.13, rechts) angefertigt.

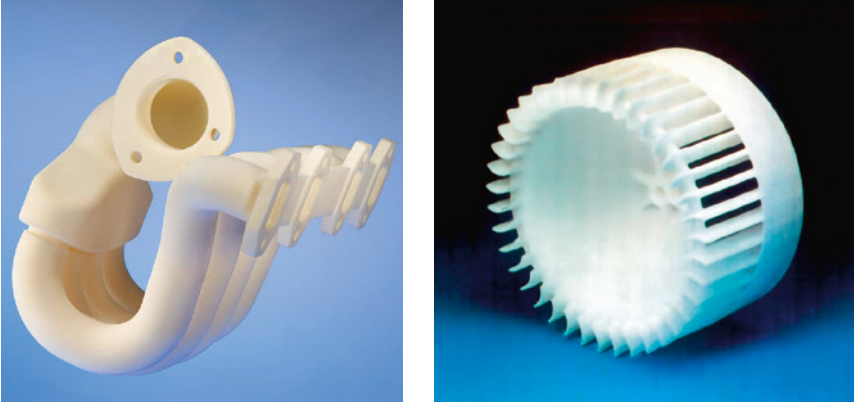


Bild 2.13 Selektives Lasersintern, SLS (3D Systems), Polyamid;
Motor-Abgassammler, Prototyp (links), Gebläserotor, Endprodukt (rechts)
(Quelle CP-GmbH)

2.1.2.2 Laserschmelzen/Selektives Laserschmelzen (SLM)

Das Laserschmelzen ist grundsätzlich dem oben beschriebenen Laser-Sinterprozess sehr ähnlich. Es wurde speziell zur Herstellung sehr dichter ($> 99\%$) metallischer Teile entwickelt. Der Laser schmilzt das Material vollständig auf. Daher erzeugt er ein örtliches (selektives) Schmelzbad, das nach dem Erstarren zu einem völlig dichten Teil führt. Der Prozess wird generell „Selective Laser Melting“ (SLM), Selektives Laserschmelzen genannt. Es existieren einige herstellereigene Bezeichnungen, darunter „Cusing“, eine Wortschöpfung mit Bestandteilen aus den Wörtern „Cladding“ und „Fusing“.

Gegenwärtig stammen die meisten dieser Maschinen aus Deutschland:

- EOS GmbH aus München,
- Realizer GmbH aus Borchten,
- Concept Laser GmbH aus Lichtenfels und
- SLM Solutions aus Lübeck.

Außerdem bietet 3D Systems, Rock Hill, SC, USA, mit der ProX Baureihe umgebrannte Systeme an, die auf dem PHENIX Prozess basieren und Direct Metal Sintering (DMS) genannt werden.

Renishaw entwickelt und vertreibt die von MTT, Großbritannien übernommenen Maschinen AM 125 und AM 250 unter eigenem Namen weiter.

Für alle metallverarbeitenden Maschinen ist ein breites Spektrum von Metallen, inklusive Kohlenstoffstählen, rostfreien Stählen, CoCr-Legierungen, Titan, Aluminium, Gold und herstellereigenen Legierungen verfügbar. Typischerweise sind Metallbauteile Endteile und werden als (direkt hergestellte) Produkte oder Teile

solcher Produkte verwendet. Charakteristische Beispiele sind die innen gekühlten Kühlstäbe aus Werkzeugstahl gemäß Bild 2.14, links, die in Spritzgießformen eingesetzt werden, und der Mikrokühler aus AlSi10Mg in Bild 2.14, rechts.

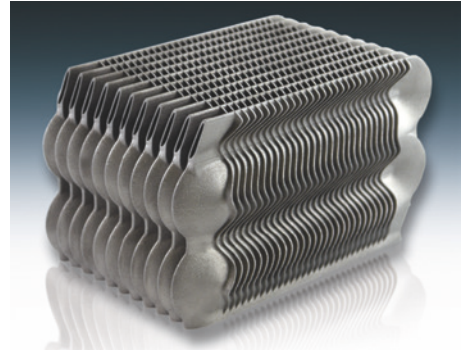
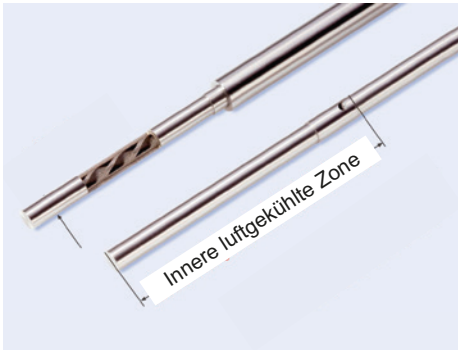


Bild 2.14 Selektives Laser Melting, SLM – Innengekühlter Stab zum Einsatz in Spritzgießformen, links (Quelle: Concept Laser GmbH); Mikrokühler aus AlSi10Mg, rechts (Quelle: EOS GmbH)

Der Maschinenaufbau entspricht weitgehend den Maschinen für das Lasersintern von Kunststoffen. Es werden Faserlaser mit sehr hoher Strahlqualität sowie abgedichtete Bauräume, die evakuiert oder mit Schutzgas gefüllt werden können, eingesetzt, um entflammable Materialien wie Titan oder Magnesium verarbeiten zu können. Integrierte Zusatzbeheizungen helfen Verzug und Verdrehungen der Teile zu vermeiden.

Maschinen für das Mikro-Laser-Sintern metallischer und keramischer Bauteile sind kurz vor der Marktreife, befinden sich jedoch noch in der Entwicklungsphase. Der Markteintritt solcher Maschinen, basierend auf Entwicklungen von 3D Mikromac, Chemnitz, Deutschland, wurde von EOS angekündigt. Die typische Schichtdicke liegt im Bereich von 1 bis 5 μm , die kleinste Wandstärke beträgt $> 30 \mu\text{m}$. Es wird ein Faserlaser mit einem Brennpunktdurchmesser $< 20 \mu\text{m}$ eingesetzt. Als Beispiel werden in Bild 2.15 Demonstrationsbauteile gezeigt.

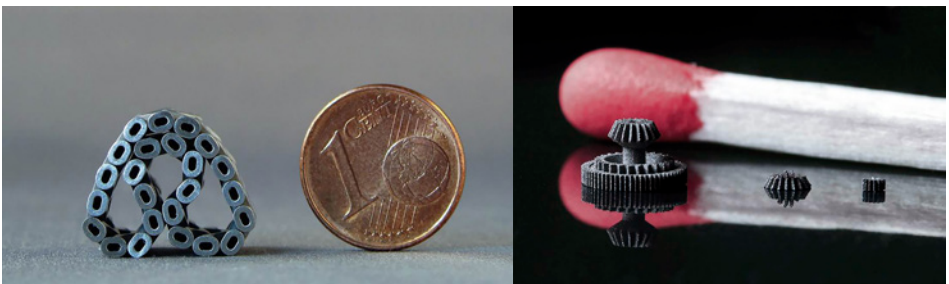


Bild 2.15 Mikro-Laser-Sintern (EOS), Demonstrations-Bauteile (Quelle: EOS GmbH)

2.1.2.3 Elektronenstrahl-Schmelzen

Das örtliche Aufschmelzen von Material kann anstelle eines Lasers auch mit einem Elektronenstrahl erreicht werden. Dieser Vorgang wird Elektronenstrahl-Schmelzen, Electron Beam Melting (EBM), genannt. Da die Materialbearbeitung mittels Elektronenstrahl ein Vakuum erfordert, wird für die Baukammer eine komplette Abdichtung erforderlich.

ARCAM AB aus Mölndal, Schweden, stellt eine für besondere Anwendungen, z. B. in der Luftfahrt, der Medizin oder der Werkzeugfertigung (Bild 2.16), konzipierte Familie von EBM-Maschinen vor.

Der Elektronenstrahl hat eine große Eindringtiefe und die Konzeption erlaubt eine sehr hohe Scangeschwindigkeit, die zugleich zur Vorwärmung genutzt werden kann. Daher ist der Prozess sehr schnell und arbeitet bei erhöhten Temperaturen. Nach Aussage des Herstellers führt dies zu reduzierten Spannungen und Verformungen sowie zu sehr guten Materialeigenschaften. Als Beispiel ist rechts in Bild 4.29 ein individuelles Schädelimplantat aus Titan, hergestellt mittels EBM, abgebildet.



Bild 2.16 Elektronenstrahl-Schmelzen (EBM): ARCAM A2X (links), EBM Funktionsschema (rechts)
(Quelle: ARCAM)

2.1.3 Extrusion/Fused Layer Modeling

Die schichtweise Aufbringung pastöser extrudierter Kunststoffe wird „Fused Layer Modeling“ (FLM), genannt. Der Prozess arbeitet mit vorgefertigtem thermoplastischem Material, das in geheizten Düsen aufgeschmolzen und als Strang aufgetragen wird.

■ 3.2 Maschinen für die additive Fertigung

Wie bereits in Abschnitt 1.3 „Maschinenklassen für die additive Fertigung“ dargestellt, kann die große und schnell wachsende Vielfalt unterschiedlicher Anlagen in vier Klassen schichtbasierter Maschinen oder auch Maschinen für additive Herstellungsverfahren, eingeteilt werden. Die vier Klassen oder Kategorien von AM-Maschinen sind Personal Printer, Professional Printer, Production Printer und Industrial Printer, vergleiche Bild 3.6.

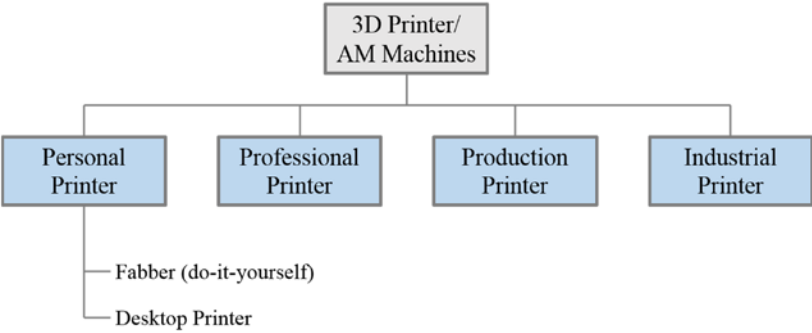


Bild 3.6 Klassifizierung 3D Printer, AM Machines¹

In Tabelle 3.1 sind die vier Klassen der AM-Maschinen den Anwendungsebenen und -Klassen sowie dem bevorzugt verwendeten Baumaterial zugeordnet.

Tabelle 3.1 Einteilung der Maschinen für die additive Fertigung

Maschinenklasse				
Bezeichnung	Personal Printer	Professional Printer	Production Printer	Industrial Printer
Anwendung	Privat/ Semi-pro	Professional	Professional/ (Industrial)	Professional/ Industrial
Baumaterial	Kunststoff	Kunststoff, Metall	Kunststoff, Metall, Keramik	Kunststoff, Metall
Anwendungsebene (siehe Bild 1.1)				
Prototypen	X			
Konzeptmodelle	X			
Funktionsbauteile		X		
Endprodukte			X	X

¹ Die Klassifizierung ist bewusst in englischer Sprache aufgeführt, obwohl die Begriffe sich in der deutschen Sprache kaum unterscheiden. Die englischen Begriffe haben sich aber in der Branche durchgesetzt.

Neben der Klassifizierung der AM-Maschinen nach Anwendungsebenen und -bereichen unterscheiden sie sich hinsichtlich der verwendeten Materialien, der Genauigkeit (Auflösung) und Belastbarkeit der Bauteile, aber auch bezüglich ihrer Komplexität drastisch.

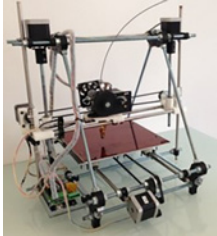
Die unterschiedlichen AM-Bauteile orientieren sich an dem umzusetzenden Verfahren und unterscheiden sich hinsichtlich der gleichen Kriterien.

Um die Möglichkeiten und Grenzen der Maschinenklassen zumindest tendenziell zu illustrieren, werden sie im Folgenden detailliert diskutiert.

3.2.1 Personal Printer

Mit komplett und in einem Schritt automatisiert fertigenden 3D-Druckern können auch Nicht-(Fertigungs-)Techniker Produkte herstellen. Möglich machen das Personal Printer. Bedeutend ist die rasch wachsende Anzahl von Personal Printern, die zu sehr günstigen Preisen, entweder als Fabber (Bausatz – DIY), beispielsweise „Prusa Mendel“, Tabelle 3.2 links oder als Desktop Printer (Komplettmaschine), beispielsweise der „Mojo“, Tabelle 3.2 rechts, zur Verfügung stehen. Aktuell (2016) gibt es über 250 Maschinen im Preissegment bis 5.000 €.

Tabelle 3.2 AM-Maschinen: Kategorie Personal Printer (Fabber und Desktop Printer)

			
Prusa Mendel RepRap-Bausatz	Ultimaker 2+ Ultimaker	Form 2 Formlabs	Mojo Stratasys
Kunststoff <i>Extrusion</i>	Kunststoff <i>Extrusion</i>	Kunststoff <i>Stereolithographie</i>	Kunststoff <i>Extrusion</i>

Die Firma SinterIt aus Krakau, Polen hat den ersten Pulverdrucker in Desktop-Größe entwickelt, mit dem Ziel das Lasersintern einem breiten Publikum zugänglich zu machen. Die Maschine „LISA“ wurde in Deutschland das erste Mal auf der Hannover Messe 2016 vorgestellt und kann heute (Juli 2016) online vorbestellt werden (unter 9.000 € inklusive 2 kg Material).

„LISA“, in Bild 3.12 (links) dargestellt, arbeitet nach dem Lasersinter-Verfahren und verarbeitet PA 12, mit einer Schichtdicke bis zu 0,06 mm.

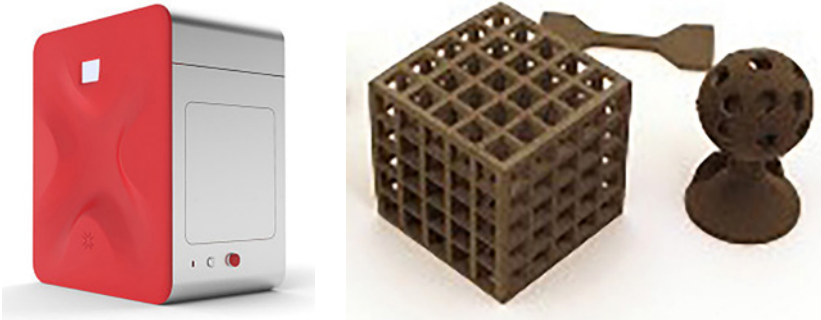


Bild 3.12 Individuelle Komplettfertigung:
Desktop Printer LISA (links), „Low-Cost Sintering“ – Bauteile aus PA 12 (rechts)
(Quelle: SinterIt)

3.2.2 Professional Printer

Die typischen Merkmale von AM-Bearbeitungszentren weisen Professional 3D Printer auf. Insgesamt findet nach wie vor eine Werkstattorganisation statt. Eine vom Bauprozess unabhängig einsetzbare Programmierung erhöht die Flexibilität. Einige manuelle Schritte sind bereits integriert und laufen (teil-)automatisiert ab. Dazu gehört beispielsweise der geschlossene Material- oder Werkstoffkreislauf. Der Programmablauf ist vollständig automatisiert. Es gibt Ansätze für eine Prozessüberwachung und das System meldet einzelne Zustände zurück.

Professional Printer sind stand alone-Maschinen zur Herstellung von Funktionsbauteilen, vergleiche Tabelle 3.5. Die Hauptanwendung von Professional Printern ist die kommerzielle Nutzung im Büro oder in der Werkstatt. Bei den meisten Druckern ist keine besondere Infrastruktur nötig, lediglich eine Steckdose und ein Tisch. Ein separater Büroraum erleichtert jedoch die Handhabung des Materials und der Teile und reduziert die Geräuschentwicklung, was generell kein wesentliches Problem darstellt.

Tabelle 3.6 gibt einen Überblick über die Professional Printer hinsichtlich Maschinenpreis, zu verarbeitbaren Materialien sowie Vor- und Nachteilen der Maschinen.

Tabelle 3.5 AM-Maschinen: Kategorie Professional Printer (Büromaschinen)

			
Agilista-3200W Keyence	Dimension Elite Stratasys	Objet 30 prime Stratasys	ZPrinter 450 3D Systems
Kunststoff <i>Polymer Printing</i>	Kunststoff <i>Extrusion</i>	Kunststoff <i>PolyJet</i>	Gipskeramik <i>3D Printing</i>

Tabelle 3.6 Professional Printer: Übersicht (Anhaltspunkte)

Professional Printer	
Maschinenpreis	Ab ca. 20.000 bis ca. 70.000 €
Software	Herstellerspezifisch Plug & Play
Materialien (Abhängig von Verfahren/ Maschine)	Kunststoff, Keramik, Metall, Gips-Stärke Pulver
Vorteile (Abhängig von Verfahren/ Maschine)	▪ Vorgegebene Parametersätze ▪ Kaum/Keine Peripherie nötig ▪ Kurze Schulung ▪ Büroumgebung ausreichend
Nachteile (Abhängig von Verfahren/ Maschine)	▪ Teilweise hohe Materialkosten ▪ Teilweise Abhängigkeit von Maschinenhersteller (Software/Material)

3.2.3 Production Printer

Production 3D Printer haben Eigenschaften einer flexiblen AM-Fertigungszelle. Dies ist ein alleinstehender 3D-Drucker oder ein AM-Bearbeitungszentrum mit darum herum angeordneten gekoppelten Automatisierungseinrichtungen. Charakteristika sind die gute Planbarkeit der Maschinenlaufzeiten durch Abschätzung oder Simulationen des Fertigungsvorgangs und damit verbunden ein bedienerarmer Betrieb, ein bezüglich der Bauteile gemischter Betrieb, Pausendurchlauf, rüstfreier Arbeitswechsel, etc. Das sind alles Eigenschaften, die für die spanende Fertigung

Tabelle 3.7 AM-Maschinen: Kategorie Production Printer

			
ProX [®] 950 3D Systems	VX2000 Voxeljet	M3 Linear Concept Laser	P800 EOS GmbH
Kunststoff Stereolithographie	Kunststoff 3D Printing	Metall Laser Cusing/Laser Melting	Kunststoff Lasersintern

Tabelle 3.8 Production Printer: Übersicht (Anhaltspunkte)

Production Printer	
Maschinenpreis	Von 130.000 € bis 1.800.000 € und darüber
Software	Herstellerspezifisch Plug & Play
Materialien (Abhängig von Verfahren/Maschine)	Kunststoff, Keramik, Metall, Gips-Stärke Pulver
Vorteile (Abhängig von Verfahren/Maschine)	▪ Vorgegebene Parameter ▪ Große Materialpalette ▪ Geringer Ausschuss
Nachteile (Abhängig von Verfahren/Maschine)	▪ Immer Nacharbeit nötig ▪ Hohe Maschinenkosten ▪ Hohe Materialkosten ▪ Werkstattumgebung erforderlich

Fortschritte markieren, aber für die AM-Fertigung als systemimmanent angesehen werden können. Aktuelle Beispiele sind die Production Printer von SLM (siehe Bild 3.13) und EOS (siehe Bild 3.14).

Ein aktuelles Beispiel für einen Production Printer ist die SLM[®] 500 HL der Firma SLM Solutions, eine Laserschmelzanlage für die Verarbeitung von Metallen, Bild 3.13. Bei den Maschinen von SLM-Solutions müssen generell verschiedene Verfahren der Schichtgenerierung unterschieden werden. In der Standardausführung bauen sich die Schichten nach dem herkömmlichen Laserschmelzprinzip auf. Die größeren Maschinen bieten zusätzlich die Möglichkeit einer Ausführung mit der sog. Doppelstrahltechnik, bei der zwei verschiedene Laser verwendet werden. Einen schwächeren, mit einem kleinen Fokus zur Generierung der Randschichten und einen mit einer hohen Leistung und einem Top-Hat-Profil. Dieser wird für die innen liegenden Bereiche einer Kontur verwendet. Aufgrund der Aufteilung der Laser wird dieses Verfahren von SLM-Solutions als Hülle-Kern-Strategie bezeichnet.



Bild 3.13 SLM® 500 HL Laserschmelzanlage mit Auspackstation PRS (links im Bild) und Pulversiebstation (in der Mitte des Bildes)
(Quelle: SLM Solutions)

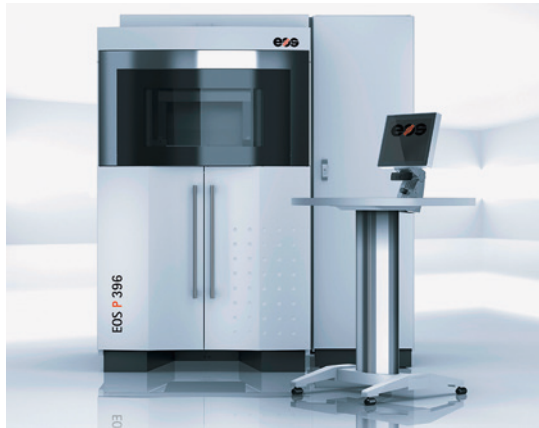


Bild 3.14 EOS P 396, Sintermaschine und Fertigungssystem für Kunststoffe
(Quelle: EOS GmbH)

Die SLM® 500 HL ist als Produktionsmaschine und -System konzipiert. Sie besitzt einen Bauraum von maximal $500 \times 280 \times 325$ mm und arbeitet mit insgesamt 4 YLR Faserlasern.

SLM Solutions liefert mit der SLM500 eine Pulversiebstation (PSX). Mit der Siebstation lässt sich die Prozesskammer vollautomatisch entleeren und der Pulverbehälter unter Inertgasatmosphäre nachfüllen. Sie trennt wiederverwendbares Pulver von Abfall und befüllt die Maschine über einen Zwischenspeicher kontinuierlich wieder.

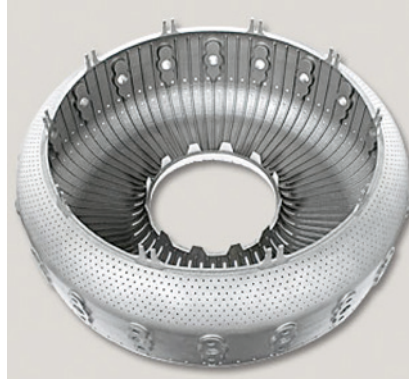


Bild 4.8 Brennkammerelement, Selective Laser Melting (SLM)
(Quelle: Concept Laser)

Direkt aus Metall gedruckte Bauteile sind technologisch und wirtschaftlich erfolgreich, wenn sie bezüglich Geometrie und Funktion optimiert werden. AM ist in der Lage, nach bionischen Prinzipien konstruierte Bauteile zu fertigen und so dieses – sich vor allem im geringeren Gewicht widerspiegelnde – Potenzial zu heben.



Bild 4.9 3D gedrucktes Bracket wird an Bord des A350XWB eingesetzt, SLM – Titan
(Quelle: Airbus)

Es ist auf den ersten Blick zu sehen, dass die Bauteile anders aussehen als konventionell gefertigte. Sie belegen damit, dass zur schnellen und effektiven Umsetzung der AM Technologie AM-gerechte Konstruktionen unabdingbar sind, siehe Abschnitt 6.2 „Konstruktion“.



Bild 4.14 Kundenspezifische Brillen; Lasersintern, Polyamid
(Quelle: Framelapp)



Bild 4.15 Sandalen „Paris“, High Heels, Lasersintern; Polyamid
(Quelle: Freedomofcreation, FOC)

Die extravaganten Sandalen in Bild 4.15 können als Archetypen individuell gestalteter, trendiger Schuhe angesehen werden, die darüber hinaus auf Wunsch in jeder Größe und Höhe angefertigt werden können. Da diese Objekte direkt genutzt werden können, kann man sie als Produkte betrachten und somit gehört der Fertigungsprozess zum Rapid Manufacturing. Obwohl die Beispielsandalen mittels Lasersintern aus Polyamid hergestellt wurden, könnten dafür auch Extrusions- und Polymerisationsprozesse mit den zugehörigen Materialien eingesetzt werden.

Auch der Einsatz additiver Verfahren bei der Produktion von Musikinstrumenten ist nicht neu, 2012 wurden bereits kunstvolle, lesergesinterte E-Gitarren aus Polyamid vorgestellt (von Professor Olaf Diegel an der Massey University in Auckland). Die Entwicklung geht aber weiter, im Mai 2016 wurde die erste 3D gedruckte Gitarre aus Aluminium vorgestellt. Der komplette Körper der Gitarre wurde in einem Stück auf einer EOS M400 (Quelle: Xilloc) gefertigt, siehe Bild 4.16.



Bild 4.16 3D gedruckte Gitarre aus Aluminium
(Quelle: Diegel/Xolloc)

Mittlerweile bieten verschiedenste Dienstleister den 3D-Druck von „Personen“ an. Full-Body Scanner, bis zu 80 Digitalkameras in einer Röhre in unterschiedlichen Winkeln angeordnet, erlauben eine Sofortbildaufnahme in der dritten Dimension. Vorteil bei dieser Art der Scanner liegt darin, dass die Person im Scannerraum nicht lange stillhalten muss, sodass auch Scans von Tieren und aus der Bewegung heraus möglich sind. Die bis zu 80 geschossenen Fotos werden dann in eine Software geladen und zu einem Volumenkörper automatisch zusammengefügt, eine nachträgliche manuelle Nachbearbeitung der Datei ist aber noch unumgänglich und erfordert viel Know-How im Bereich der Modellierung. Der aufbereitete Datensatz wird dann meist an einen dezentralen Druckdienstleister gesendet und mittels 3D-Drucken (Pulver-Binder-Verfahren), vergleiche Abschnitt 2.1.4 „Pulver-Binder-Verfahren“, ausgedruckt, siehe Bild 4.17. Die Nachbearbeitung der oftmals filigranen Strukturen ist aufwendig und kostet Zeit.

Sogar die kreative Arbeit von Künstlern kann durch additive Herstellungsverfahren erfolgreich unterstützt werden. Bildhauer arbeiten häufig mit Tonmodellen, die schrittweise verfeinert und schließlich abgegossen werden. Alternativ kann ein erstes handgefertigtes Modell gescannt und in ein AM-Teil aus Polyamid (durch Sintern) oder Gipskeramik (durch 3D-Drucken) umgewandelt werden. Dieses Urmodell kann manuell ausgearbeitet werden, um die Handschrift des Künstlers widerzuspiegeln und wird anschließend über ein Wachsmodell in eine Unikatserie aus Bronzeguss überführt.



Bild 4.17 Body Scanning und AM durch 3D-Drucken; Gipskeramik
(Quellen: Nathalie Richards, links, Caters News Agency, rechts)

■ 4.4 Spielzeugindustrie

Obwohl Spielzeuge auch zu den Konsumgütern gezählt werden, wird die Spielzeugindustrie üblicherweise getrennt betrachtet. Sie befasst sich in der Mehrzahl mit der Serienherstellung von Kunststoffteilen für Kinderspielzeuge, jedoch in zunehmendem Maße auch mit individualisierten Modellen von Automobilen, Flugzeugen und Eisenbahnen – auch und eher vorzugsweise für Erwachsene. Diese Modelle erfordern feine Details und eine einfühlsame Skalierung, die kleine und große Details unterschiedlich behandelt. Abhängig vom Maßstab sind einige AM-Prozesse geeigneter als andere. Bild 4.18 zeigt das Modell einer Spielzeug-Dampflokomotive im Maßstab G (1 : 22,5), das einschließlich des Tenders nahezu 1,5 Meter lang ist. Für die Anfertigung dieses Objektes ist das Schicht-Laminat-Verfahren gut geeignet, da das Material preisgünstig ist und die Details nicht zu klein sind. Für diese Art von (Vitrinen-) Modellen sind physische Eigenschaften wie Belastbarkeit und auch feinste Details weniger wichtig als der Gesamteindruck.



Bild 4.18 Modell einer Spielzeug-Dampflokomotive Maßstab G (1 : 22,5), Laminated Object Manufacturing (LOM); Papier; Nachbehandlung mittels Lasur, ansonsten unbearbeitet
(Quelle: CP-GmbH)

Stichwortverzeichnis

Symbole

2 ½D-Prozess 6
3D-Bioplotter 69
3D-Datensatz 75
3D-Dekorationsobjekte 132
3D-Drucken 2, 55, 124
3D-Drucker 27
3D-Grafiken 131
3D Printer 27
3D Printing 2, 55

A

Aachener Dom 130
Abformprozess 105
ABS-Kunststoff 47, 180
ACES Injection Molding (AIM) 17
Acrylate 177, 180
Additive Fertigungsverfahren 35
Additive Herstellungsverfahren 4
Additive Manufacturing 2
– Prinzip 35
Additive Manufacturing File Format
(AMF) 82, 99
Aerosoldrucken 67
Aerosolprinting 67
Aktive Personalisierung 163
Alterung 177
Aluminium 49
– stützform 24
AMF-Format 76
– Hauptbefehle 83

AM-Front-End 76
AM-Maschinen, Laser-Stereolithographie
39
Amorphes Polystyrol 180
AM-Prozess
– direkter Prozess 8
– Erzeugung der physischen Schicht
37
– Generische Bezeichnungen 38
– Herstellungsprozess 35
– indirekter Prozess 8
– Konturierung der Schichten 37, 38
– Physikalisches Prinzip der Erzeugung
38
– Polymerprinting 42
– Stereolithographie 39
– Treppenstufeneffekt 36
AM-Prozesskette 76
AM-Technologien 7
– Rapid Manufacturing 7
– Rapid Prototyping 7
Anaplastologen 123
anisotrope Eigenschaften 174
anisotropes Verhalten 53
Anisotropie 174
Anschauungsmodelle 28
Anwendungen 101
Anwendungen 3D-Drucken
(Pulver-Binder-Prozess) 132
– Architektur 128
Anwendungen 3D-Metalldrucken 116

Anwendungen Lasersintern 103, 112, 127
 Anwendungen LOM 114
 Anwendungen SLM 106, 108
 Anwendungen Stereolithographie 104, 109
 Anwendungsebenen 1
 Architektur 126
 ASTM F2915-12 83
 Ausschmelzverfahren 56
 Automobilindustrie 102
 Automobilkomponenten 102

B

Bauorganisation 195
 Bauteile, Langzeitverhalten 177
 beschichtete Metallplatten 180
 bewegliche Elemente 146
 Bindefehler 177
 Bionisches Handhabungssystem 149
 Body Scanning 117
 Break Out 48

C

CAD-Rendering 133
 Chemische Additive 177
 Cloud-Fabbing 86
 Cloud Production 166
 CoCr 123
 – Legierungen 49
 Collagen 69
 Concept Modeling 8
 conformal cooling 120, 141
 Connex 43
 Coproduktion 166
 Cusing 49
 Customized Production 158

D

Delamination von Schichten 174
 Dentalrestauration 162

Desktop Manufacturing 2
 dichte Bauteile 175
 Diffusionsschweißen 176
 Digitales Produktmodell 6
 Digital Light Processing 44
 digital to object 188
 Direct Layer Manufacturing Process 35
 Direct Manufacturing 12, 13
 Direct Metal Printing 58
 Direct Metal Sintering (DMS) 49
 Direct Tooling 14
 direkte Bauteilherstellung 28
 direkte Schichtbau-Herstellungsverfahren 35
 direkte Schnittdaten, SLC 81
 direkte Werkzeugherstellung 28
 Distributed Customized Production 166
 DLP-Projektor 37, 44
 Dreidimensionales Drucken 55
 Drucker 27

E

EBM 51
 Edelmetalle 182
 Einschlüsse 177
 Einzelstücke 156
 Electron Beam Melting (EBM) 45, 51
 Elektronenstrahl-Schmelzen (EBM) 51
 Endprodukt 77
 Entformen der Stützen 54
 Entmischung 177
 EOS 800/900 179
 EOS P 800 103
 Epithese 124
 Epithetiker 123
 Epoxidharz 177, 180
 Erodieren 16
 Ersatzteil-Problematik 189
 Extrusionsverfahren 52
 Extrusionsverfahren (FDM) 130

F

Fabber 164
Fabber Communities 86
Fabbern 175
Fabrikator 27
farbiges 3D-Drucken 132
farbige Teile 55
Faserlaser 50
faserverstärkte Leichtbaustrukturen 184
FDM 130
FDM-Prozess 53
FDM-Teile, Oberflächenstrukturen 53
Festkörpergelenk 148, 190
Fibrin 69
file-Typen 81
film hinges 190
film joints 190
Filmscharniere 47, 145, 190
Finishing 41, 77
flexures 190
Folgeprozesse 69
Folien 180
Food Processing 153
Formenbau 119
Formeneinsatz 15
Formrahmen 25
Freeform Manufacturing 2
Freiformobjekte 132
Front-End-Software 76
Füllstoffe 176
Functional Prototyping 10, 11
Funktionsprototyp 10, 28
Fused Deposition Modeling (FDM) 12, 52
Fused Layer Modeling 51, 52

G

Galvo-Typ 37
gefüllte Materialien 48
Generative Fertigungsverfahren 2

Generative Herstellung 2
generische Bezeichnung 37, 55
Gießharzwerkzeuge 24
Gipskeramik 56
Gold 49
Graded Materials 71
Gradientenmaterialien 71, 184
Grünling 38

H

Hart-Weich-Kombinationen 187
Herstellung von Kleidung 150
Herstellung von Nahrungsmitteln 153
Hochgeschwindigkeitsfräsen 16
Hochtemperaturmaschine 179
Hochtemperaturthermoplast 53
Hörgeräteschalen 160
Hybridverfahren 64
Hydroxyapatit 69

I

Implantate 123
Indirect Manufacturing 25
Indirect Prototyping 19
Indirect Tooling 22
Indirekte Prozesse 19
Individualisierung 156, 158
individualization 156
Individuell zugeschnittene (graded) Werkstoffe 186
Infiltration 77, 174
infiltriert 55, 56
innere Kühlkanäle 15
Integrierte Geometrie 143
Isotrop 174
Isotrope Grundmaterialien 176
isotropes Materialverhalten 174

K

Kalibrierung 194
Kavitäten 14

keramische Materialien 107, 183
 Kleinserienproduktion 156
 Kohlenstoffstähle 49
 komplexes Kühlnetz 141
 Kompositteile 184
 Kompositwerkstoffe 184, 186
 Konsumgüter 109
 konturangepasste Kühlung 120, 121
 konturnahe Kühlkanäle 141
 Konzeptmodell 9, 10, 56
 Korrosion 177
 Kriechen 190
 Kühlnetz 121
 Kunst 116
 Kunstobjekte 116
 Kunststoffdreieck 181
 Kupfer 182

L

Laminated Object Manufacturing (LOM)
 61
 Lampen-Masken-Verfahren 44
 Landschaftsgestaltung 126
 Laser Cusing 45
 Laser Melting 45
 Laserplotter 61
 Laser-Scanner, Prinzip 66
 Laserschmelzen 46, 49
 Lasersintern 25, 45, 46, 103
 – Kunststoffe 176
 – Polystyrol 25
 – Werkstoffe 179
 Laser-Stereolithographie (LS) 39, 121
 – Schema 40
 Layer Lamine Manufacturing (LLM)
 60, 61
 Luftfahrtindustrie 107

M

M3D-Prozess 183
 Magnesium 50

Managementsystem 195
 Materialdatenbank 76
 Materialdatenblätter 181
 Materialien
 – für additive Herstellungsverfahren
 172
 – für AM-Metallprozesse 182
 Mathematische Funktionen 131
 Mcor IRIS 62
 Mcor Matrix 62
 Meta Design 163
 Metalldruckprozess 58
 Metallfolien-LOM 64
 Mikrobauerteile 183
 Mikro-Laser-Sintern (EOS) 50
 Mikro-Stereolithographie 45
 Modellguss 162
 Monomer 39
 Multi-Material 152
 – Prozesse 153

N

Nachbehandlung 56
 Nachbehandlungsofen 38
 Nahrungsmittelbereich 55
 Nahrungsmitteldrucker 154

O

Office Printer 29
 On-Demand Manufacturing 3
 Oxidation 177

P

PA 47
 PA 11 47
 PA 12 47
 Part Property Management (PPM) 176
 Part Property Profiles (PPPs) 176
 Passive Personalisierung 160
 PC (Polycarbonat) 47
 PEEK (Polyetheretherketones) 47, 179

Perfactory 44
Personal 3D Drucker 86
Personal 3D-Drucker 28
Personal 3D Printer 98, 164
Personal Fabricator 164
Personalisierung 156, 160
personalization 156
Personal Printer 27, 28
pharmazeutischer Bereich 55
Photopolymerisation 177
PLY 76
PMMA-Kunststoff 26
Polyamide 47, 178
Polycaprolactone (PCL) 69
Polycarbonat (PC) 47
Polyimide 181
PolyJet Matrix 43
Polymerdrucken 121
Polymerdruckverfahren 42
Polymerisation 38, 39
Polymerisationsprozess 162
Polymerjetting 42
Polymerprinting 43
Polyphenylsulfon 179
Polyurethan (PUR) 24
Poren 177
Porosität 174
Positionierung der Bauteile im Bauraum 191
Post-Processing 41, 77
Powder Binder Process 57
PPSU-Material 179
Printer 27
Production Printer 27, 28
Produktions 3D-Drucker 28
Professional Printer 27, 28
Professionell 3D-Drucker 28
Prototyp 77
Prototyper 27
Prototype Tooling 16
Pulver-Binder-Prozess 122

Pulver-Binder-Verfahren 55, 124
Pulverkuchen 47

R

Rapid Manufacturing 12
– Prozesskette 79
Rapid Prototyping 2
– Prozesskette 77, 78
– Software 76
Rapid Tooling 14
Raumtemperatur Vulkanisation 69
Recoating 47
– Prozess 61
relative Passgenauigkeit 189
Room Temperature Vulcanization, RTV 35, 69
rostfreie Stähle 49

S

Scaneinrichtung 39
Scanner 47
Schädelmodelle 78
Scharnier 145
Schichtbautechnologie 4
Schichtbauweise 5
Schichtdicke 37
Schicht-Laminat-Verfahren 60
Schnapphaken 47, 145
Schnappverbindungen (snap-fits) 190
Schnappverschluss 148
Schutzgas 50
schwer entflammbare Materialien 48
Sekundäre Rapid Prototyping Prozesse 69
Selective Laser Melting (SLM) 49
Selective Mask Sintering 45
Selektives Laserschmelzen (SLM) 13, 49, 106, 181
Selektives Lasersintern 45, 46, 49
Self Customization 164, 165
Silikonguss 69

Solid Imaging 8
Solids 35
Spielzeugindustrie 114
Standard Transformation Language 80
stärkeähnliche Pulver 56
Stereolithographie 18
Stereolithography Language 80
STL-Datensätze, Fehler 82
STL-Format 76, 80, 98
Stützen 38

T

Tessalation 80
Testwürfel für verschiedene Geometrien 193
Textur 56
Thermojet-Drucken 42
Three Dimensional Printing 55
Titan 49, 50, 51, 123
Toleranzen 188
Toleranzfeld 188
transluzente 178
Treppenstufeneffekt 36
Triangulation 80

U

Überschusspulver 59
Ultraschallschweißen 176
Urmodell 19, 22
UV-Beständigkeit 177

V

Vakuumgießen 21, 35, 69, 70
Vakuumguss 22
VDI 3405 2
VDI Arbeitskreis FA 105 187
Verteilte individualisierte Produktion 166
Vollformguss 25
VRML 76, 81

W

Wachsausschmelzverfahren 26
Werkzeugeinsatz 14, 15
Wiederbeschichtung 47
Wirbelsintern 177

Z

Zahnersatz 162
Z-Corporation 55
Zykluszeit 15