

CHRISTOPH KLAHN (HRSG.) / MIRKO MEBOLDT (HRSG.)

Entwicklung und Konstruktion
für die

Additive Fertigung



Ein Fachbuch von

**konstruktions
praxis**



Vogel Business Media

Dr.-Ing. Christoph Klahn (Hrsg.) /
Prof. Dr.-Ing. Mirko Meboldt (Hrsg.)
Dr.-Ing. Christoph Klahn / Prof. Dr.-Ing. Mirko
Meboldt / Filippo Fontana / Bastian
Leutenecker-Twelsiek / Jasmin Jansen

Entwicklung und Konstruktion für die Additive Fertigung

**Grundlagen und Methoden für den Einsatz
in industriellen Endkundenprodukten**

Vogel Business Media

Die Herausgeber:

Dr.-Ing. CHRISTOPH KLAHN

Prof. Dr.-Ing. MIRKO MEBOLDT

Die Autoren:

Dr.-Ing. CHRISTOPH KLAHN, inspire AG

Prof. Dr.-Ing. MIRKO MEBOLDT, ETH Zürich, inspire AG

FILIPPO FONTANA, ETH Zürich

BASTIAN LEUTENECKER-TWELSIEK, ETH Zürich

JASMIN JANSEN, ETH Zürich, inspire AG

Weitere Informationen:

www.vbm-fachbuch.de



<http://twitter.com/vbmfachbuch>



www.facebook.com/vbm-fachbuch



www.vbm-fachbuch.de/rss/buch.rss_

ISBN 978-3-8343-3395-7

1. Auflage. 2018

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Germany

Copyright 2018 by Vogel Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg



Der **Onlineservice InfoClick** bietet unter www.vbm-fachbuch.de/infoclick nach Codeeingabe zusätzliche Informationen und Aktualisierungen zu diesem Buch.

InfoClick

In 2 Schritten zum Onlineservice

1. Einfach www.vbm-fachbuch.de/infoclick aufrufen.
2. Den unten stehenden Zugangscode in die Suchleiste eingeben und bestätigen.

Sofern Aktualisierungen oder Zusatzinformationen zu Ihrem Buch bereitstehen, werden diese anschließend unterhalb der Eingabemaske aufgeführt.



Ihr persönlicher Zugang
zum Onlineservice



339504990001

Vorwort

Seit der Entwicklung des ersten additiven Fertigungsverfahrens im Jahr 1984 ist daraus bis heute eine ganze Verfahrensfamilie mit über zwei Dutzend verschiedenen Prozesstechnologien entstanden. Diese Entwicklung zeigt den beeindruckenden technologischen Fortschritt im Bereich der Additiven Fertigung. Die Technologie ist noch jung, und die intensiven Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Industrie und Universitäten lassen noch viele kontinuierliche Verbesserungen und bahnbrechende Technologiesprünge erwarten. Die Additive Fertigung (AM, engl.: *Additive Manufacturing*) heute ist eine reife Produktionstechnologie in ihren Anfängen.

Seit den 1990er-Jahren hat die Additive Fertigung im Bereich Prototypen-, Werkzeug- und Musterbau unbemerkt vom breiten Interesse Einzug in die industrielle Praxis gehalten. In diesen Bereichen ist sie zu einem relevanten Wertschöpfungstreiber geworden und dort inzwischen nicht mehr wegzudenken. Mit dem breiten Medieninteresse und der steten Weiterentwicklung der Verfahren und Werkstoffe rückt die Additive Fertigung nun auch in den Fokus für den Einsatz in der Fertigung von Serien- und Endkundenteilen.

Doch wird dieser Schritt in Richtung Serien- und Endkundenanwendungen meist unterschätzt. Oft sind die Verfahren bekannt und etabliert aus dem Prototypenbau, doch mit dem Schritt in neue Anwendungsfelder betreten die meisten Firmen absolutes Neuland: Standards, Dimensionierungsgrundlagen, Konstruktionsmethoden, technisch-wirtschaftliche Berechnungsgrundlagen, CAD-Tools und Erfahrung für die Entwicklung von additiven Serien- und Endkundenteilen existieren zum Großteil noch nicht oder sind wenig etabliert. Industrieunternehmen, die das Ziel haben, additiv gefertigte Endkundenteile zu entwickeln, sehen sich schnell ähnlichen Fragestellungen gegenüber. Das Buch widmet jeder dieser Fragestellungen ein Kapitel mit praxisorientierten Methoden und Beispielen.

- Welche AM-Verfahren gibt es und welche eignen sich für industrielle Endkundenbauteile? (Kapitel 1)
- Wie können AM-Verfahren mit konventioneller Fertigung kombiniert werden? (Kapitel 2)
- Wie sieht die digitale Prozesskette aus? (Kapitel 3)
- Welche Qualität haben AM-Bauteile und wie kann sie geprüft werden? (Kapitel 4)
- Wie sieht die Kostenstruktur von AM-Bauteilen aus? (Kapitel 5)
- Was sind etablierte Anwendungsfelder für AM? (Kapitel 6)
- Wie können potenzialträchtige Bauteile und Anwendungsfelder für AM identifiziert werden? (Kapitel 7)
- Wie werden Bauteile für AM optimal konstruiert? (Kapitel 8)
- Was sind Beispiele für erfolgreich implementierte AM-Endkundenbauteile? (Kapitel 9)
- Wie sehen die Schritte aus, mit denen sich AM erfolgreich im Unternehmen implementieren lässt? (Kapitel 10)

Ziel dieses Buches ist es, nicht nur einen Überblick über die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten der Additiven Fertigung zu geben, sondern diese auch so anschaulich wie möglich zu präsentieren. Aus diesem Grund stellen die Autoren zahlreiche Beispiele additiv gefertigter Produkte aus der Industrie vor, die als Anschauungsmaterial dienen. Es kann vorkommen, dass einige dieser Beispiele in den unterschiedlichen Kapiteln mehrfach vorgestellt werden, wobei verschiedene Aspekte und Besonderheiten des jeweiligen Produkts bzw. seiner Herstellung hervorgehoben werden. Auch einige grundlegende Informationen zur Additiven Fertigung werden in den diversen Kapiteln mehrfach aufgegriffen.

Dieses Vorgehen soll bewusst das Querlesen des Buches erleichtern, ohne die Notwendigkeit des dauernden «Hin- und Herblätterns» auf der Suche nach vorhergehenden Informationen. Es lässt sich leider nicht vermeiden, dass es dadurch im Buch zu Dopplungen von Bildern und Inhalten kommt.

Der Einstieg in die Technologie ist eine Herausforderung, und viele Unternehmen entscheiden sich dazu abzuwarten, da das Potenzial nur vage abgeschätzt werden kann und der Aufwand und das damit verbundene Risiko als zu groß angesehen werden. Bei einem richtigen Einsatz und den geeigneten Anwendungen birgt die Additive Fertigung jedoch ein hohes Innovationspotenzial und auch schon kurzfristig messbaren Nutzen. Die Anzahl von spezifischen AM-Patenten in Anwendungen steigt rasant.

Das vorliegende Buch schafft ein Grundlagenwerk für die industrielle Entwicklung und Konstruktion von additiv gefertigten Serien- und Endkundenteilen, indem es praxisgerecht Methoden und Wissen bereitstellt, die eine erfolgreiche Implementierung additiver Verfahren in Unternehmen unterstützen. Neben neuen Methoden und Vorgehensweisen zeigt das Buch anschaulich Möglichkeiten der Implementierung anhand einer Vielzahl von erfolgreichen Produktbeispielen aus der Industrie.

Erfolgreiche Pionieranwendungen zeigen eindeutig, dass die additive Technologie reif ist für Serienanwendungen. Die Herausforderung besteht in einem ersten Schritt darin, die richtigen Anwendungsfelder im eigenen Unternehmen zu identifizieren und in einem zweiten Schritt Lösungen für die Additive Fertigung zu entwickeln. Der Weg, dies zu realisieren, ist nicht einfach. Es erfordert die Bereitschaft, Lösungen komplett neu zu denken – und zwar von der Konstruktion bis zur kompletten Wertschöpfungskette. Rückblickend scheinen alle Lösungen offensichtlich zu sein – denn, so hat es OSCAR WILDE einmal gesagt: «Die Zukunft gehört denen, die die Möglichkeiten erkennen, bevor sie offensichtlich werden.»

Unternehmen, die schon heute die Fähigkeit besitzen, Additive Fertigung wirtschaftlich erfolgreich in Serien- und Endkundenprodukten einzusetzen, sind in einer exzellenten Ausgangssituation, von zukünftigen Entwicklungen weiter zu profitieren.

Dr.-Ing. Christoph Klahn
Prof. Dr.-Ing. Mirko Meboldt

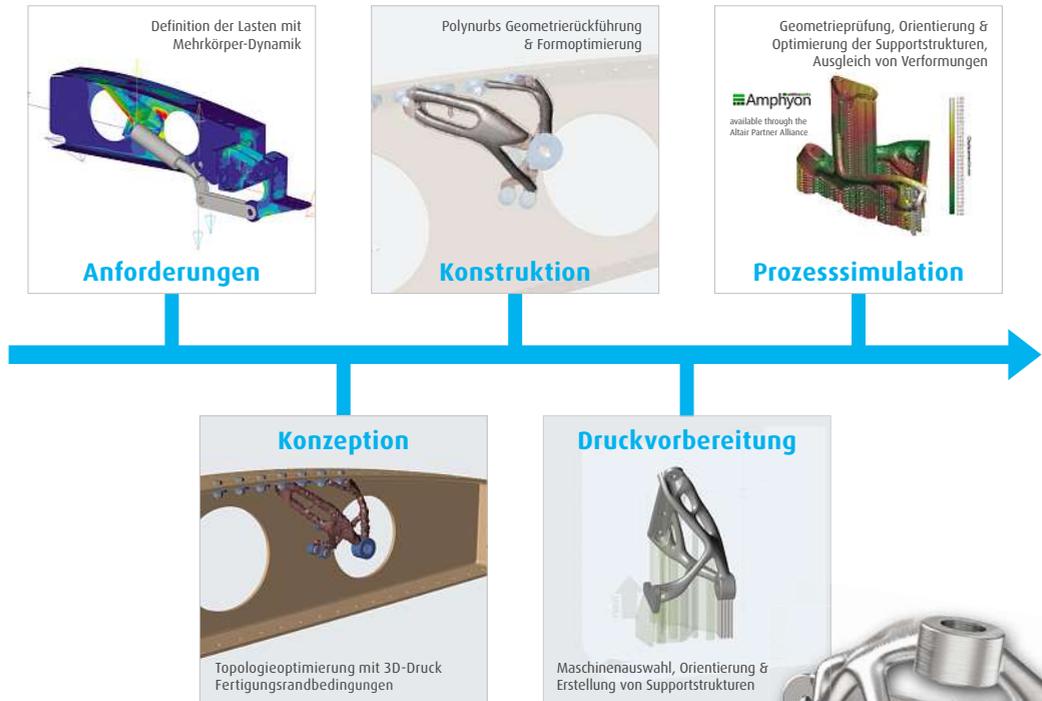
Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Überblick über die additiven Fertigungsverfahren	11
1.1 Prinzip der Additiven Fertigung	11
1.2 Fused Deposition Modelling	15
1.3 Lasersintern	18
1.4 Laserschmelzen	20
2 Integration additiver Fertigungsverfahren in die Produktion	27
2.1 Direkte Integration der Additiven Fertigung in die Prozesskette	27
2.2 Indirekte Integration der Additiven Fertigung in die Prozesskette	28
3 3D-Datenerzeugung für additive Fertigungsverfahren	33
3.1 Prozesskette der Datenvorbereitung	33
3.2 CAD & Tools	36
3.3 Dateiformate	38
3.3.1 STL	38
3.3.2 AMF	40
3.3.3 3MF	41
3.4 Topologieoptimierung	41
3.5 3D-Scannen und Reverse Engineering	45
3.5.1 Photogrammetrie	45
3.5.2 Laserscanner	46
3.5.3 Streifenlichtscanner	46
3.5.4 Reverse Engineering	48
4 Qualitätssicherung und Kontrolle additiv gefertigter Bauteile	49
4.1 Qualitätssicherung während des Fertigungsprozesses	49
4.1.1 Fused Deposition Modelling	49
4.1.2 Lasersintern	51
4.1.3 Laserschmelzen	52
4.2 Kontrolle der gefertigten Bauteile	54
4.2.1 Zerstörende Prüfung von Fertigungsbegleitproben	54
4.2.2 Zerstörungsfreie Prüfung von Bauteilen	55
5 Kostenstruktur der Additiven Fertigung	63
5.1 Einleitung	63
5.2 Kosten bei Eigenfertigung	66
5.3 Kosten bei Fremdbezug	67
5.4 Lebenszykluskosten	69
6 Anwendungsfelder Additiver Fertigung im OEM	71
6.1 Einleitung	71
6.2 Additive Fertigung als Wertschöpfungstreiber	72

6.3	Anwendungsfelder Additiver Fertigung entlang der Wertschöpfungskette	73
6.3.1	Prototyping und agile Produktentwicklung	75
6.3.2	Verbesserte Produkte durch Additive Fertigung	79
6.3.3	Inkrementelle Markteinführung	81
6.3.4	Kundenspezifische Produkte: Customization mittels Additiver Fertigung	84
6.3.5	Additiver Werkzeug- und Formenbau	89
6.3.6	Additiv hergestellte Fertigungsmittel	90
6.3.7	Flexiblere Auftragsabwicklung	92
6.3.8	Rückwärtsintegration durch Additive Fertigung	94
7	Auswahl von Bauteilen und Baugruppen für die Additive Fertigung	95
7.1	Gründe für die Additive Fertigung	95
7.2	Strategische Entscheidungen vor der Bauteilauswahl	96
7.3	Vorgehen für die Bauteilauswahl ohne Veränderung der Bauteilform	97
7.4	Vorgehen für die Bauteilauswahl mit Veränderung der Bauteilform	99
7.4.1	Funktionsintegration	100
7.4.2	Performancesssteigerung	100
7.4.3	Leichtbau	101
7.4.4	Kleinserie / Individualisierung	102
7.5	Vorgehen bei Neukonstruktionen	102
7.6	Prozess zur Identifikation und Beurteilung von Bauteilen	103
8	Gestaltungsleitfaden für die Additive Fertigung	107
8.1	Aufbau und Struktur des Leitfadens	107
8.2	Verfahrensmerkmale der Additiven Fertigung	109
8.2.1	Schichtweiser Aufbau	109
8.2.2	Treppenstufeneffekt	109
8.2.3	Werkstoffe	111
8.2.4	Anisotropie	111
8.2.5	Eigenspannungen und Verzug	113
8.2.6	Supportstrukturen (Stützstrukturen / Hilfsgeometrien)	114
8.2.7	Restpulver	115
8.2.8	Mögliche Auflösung	116
8.3	Verfahrensspezifische Gestaltungsprinzipien	117
8.3.1	Funktionsorientierte Gestaltung	118
8.3.2	Funktionsintegration	122
8.3.3	Frühzeitiges Festlegen der Bauteilorientierung	124
8.3.4	Materialminimalismus	128
8.3.5	Vermeidung von Stützstrukturen	130
8.3.6	Vermeidung von Verzug	132
8.3.7	Integrierte Halbzeuge und Komponenten	135
8.3.8	Konstruktiver Toleranzausgleich	136
8.3.9	Pulverentfernung ermöglichen	137
8.3.10	Nachbearbeitung sicherstellen	139
8.4	Gestaltungsrichtwerte	141
8.4.1	Wanddicke	141
8.4.2	Freiwinkel	143

8.4.3 Spaltbreite	144
8.4.4 Kanaldurchmesser	145
8.4.5 Überhang	146
8.4.6 Materialkennwerte	147
8.5 Erweiterung des Gestaltungsleitfadens durch Unternehmen	148
9 Anwendungsbeispiele Additiver Fertigung aus der Industrie	153
9.1 Übergangsstück für einen hocheffizienten Wärmetauscher	153
9.2 Fördertöpfe für Automationstechnik	155
9.3 Transparente herausnehmbare Zahnspangen	158
9.4 Abgestimmte Streulichtblenden für modulare High-End-Kameras	161
9.5 Batteriekühlsystem für das Flugzeug Solar Impulse	164
9.6 Ionisierer zur Reinigung von Chip-Bonding-Substraten	166
9.7 Patientenspezifische Einweg-Schnittschablonen für chirurgische Eingriffe	168
9.8 Zahnräder für Tram-Rolldisplays	171
9.9 Automatisiertes Zuführsystem für spritzgussgefertigte Steckverbinder	174
9.10 Additiv gefertigte Einsätze für CFK-Composite-Rahmen einer Flugdrohne	177
9.11 Strukturkomponenten für das «Chairless Chair»-Exoskelett	179
10 Strategische Implementierung Additiver Fertigung beim OEM	183
10.1 Voraussetzungen für die Implementierung	183
10.2 Einbindung der Mitarbeiter bei der Implementierung von AM	186
10.3 Beschleunigung des Wissenstransfers durch ETM	188
10.3.1 Erster Teil des ETM: Expertise in der Bauteilauswahl	189
10.3.2 Zweiter Teil des ETM: Design-Expertise	191
Abkürzungen	193
Lebensläufe	195
Literaturverzeichnis	197
Quellenverzeichnis der Bilder	204
Stichwortverzeichnis	206

SIMULATION ALS GESTALTUNGSWERKZEUG FÜR DIE ADDITIVE FERTIGUNG



**Additiv konstruieren heißt additiv denken!
Lastgerecht, fertigungsgerecht und funktionsintegriert.**

Altair bietet Ihnen mit den Produktfamilien solidThinking® und HyperWorks® die passende Lösung für die Entwicklung additiv gefertigter Produkte. Eine offene, durchgängige, digitale Prozesskette, wie sie mit den Altair Lösungen möglich ist, führt Sie schnell und sicher zum Ergebnis und schafft die Grundlage für rentable Konstruktionen aus dem 3D-Drucker.

Entdecken Sie erfolgreiche Anwendungsbeispiele unter:
www.altair.de/3d-Druck



1 Überblick über die additiven Fertigungsverfahren

Additive Fertigungsverfahren sind heutzutage so weit entwickelt, dass sie für die Herstellung von Bauteilen in Industrie- und Endkundenprodukten eingesetzt werden. Durch weitere Fortschritte in Sachen Produktivität und Qualität wird die Additive Fertigung zukünftig in immer mehr Bereichen Anwendung finden. Dieses Kapitel stellt das Prinzip der Additiven Fertigung vor und beschreibt die derzeit im industriellen Kontext wichtigsten Verfahren. Die Additive Fertigung ist verglichen mit anderen, konventionellen Fertigungsverfahren eine noch recht junge Technologie. Deshalb ist ein Großteil der zugehörigen Begriffe bis dato nicht normiert und es ist nicht immer absehbar, welche Bezeichnungen sich in der Normung und im allgemeinen Sprachgebrauch durchsetzen werden. Ein weiterer Schwerpunkt dieses Kapitels liegt deshalb auf der Definition der im Rahmen dieses Buches verwendeten Begrifflichkeiten.

1.1 Prinzip der Additiven Fertigung

Additive Fertigungsverfahren (AM, engl.: *Additive Manufacturing*) zeichnen sich dadurch aus, dass dreidimensionale Bauteile in einem automatisierten Prozess schichtweise aus einem formlosen oder formneutralen Material aufgebaut werden.

Entsprechend der Systematik der Fertigungsverfahren aus DIN 8580 zählt die Additive Fertigung zu den urformenden Verfahren, da die Bauteile aus einem formlosen Ausgangsmaterial (Flüssigkeit, Pulver) oder formneutralen Ausgangsmaterial (Filament) hergestellt werden. Die entscheidenden Merkmale sind hierbei

- der schichtweise Aufbau, als Abgrenzung zu subtraktiven Verfahren (z. B. Fräsen) und anderen urformenden Verfahren (z. B. Feinguss), sowie
- der automatisierte Prozess, der handwerkliche Verfahren (z. B. Handlaminieren) ausschließt.

Bild 1.1 zeigt das Prinzip der Additiven Fertigung am Beispiel eines pulverbettbasierten Verfahrens, bei dem der Werkstoff mit einem Laserstrahl Schicht für Schicht verschmolzen wird. Für den Fertigungsprozess muss das 3D-CAD-Modell des Bauteils zunächst mit einem geeigneten Programm ausgerichtet, angepasst und in einzelne Schichten zerlegt werden. Kapitel 3 stellt die Schritte dieser Datenvorbereitung eingehender vor.

DEFINITION

Additive Fertigung (AM, engl.: *Additive Manufacturing*): Gruppe von Fertigungsverfahren, die dreidimensionale Bauteile in einem automatisierten, schichtweisen Prozess aus einem formlosen oder formneutralen Material aufbauen.



Die AM-Maschine steuert anhand der vorbereiteten Daten den zyklischen Prozess aus Auftragen einer Pulverschicht, Aufschmelzen der Bauteilschicht durch Belichtung mit einem Laserstrahl und Absenken von Bauteil und Pulverbett. Dieser Zyklus wird so lange durchlaufen, bis die letzte Schicht abgeschlossen ist. Danach wird das Pulver entfernt und das Bauteil aus der Maschine entnommen.

Die additiven Verfahren Lasersintern (SLS, engl.: *Selective Laser Sintering*) und Laserschmelzen (SLM, engl.: *Selective Laser Melting*) fertigen Bauteile nach diesem Prinzip. Sie werden in den Abschnitten 1.3 und 1.4 ausführlich vorgestellt.

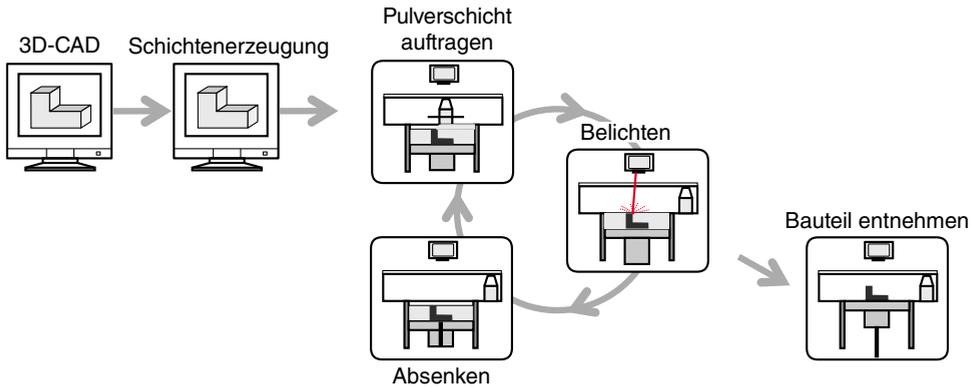


Bild 1.1 Prinzip der Additiven Fertigung am Beispiel eines pulverbettbasierten Laserverfahrens
[Quelle: ETHZ pd/z, nach Poprawe 2005]

Das Erstellen eines dreidimensionalen Datenmodells für die Additive Fertigung, das Zerlegen des Modells in einzelne Schichten und die Steuerung des Fertigungsprozesses erfordern eine ausreichende Rechenleistung. Obwohl erste Konzepte zur Additiven Fertigung bereits in den 1960er-Jahren veröffentlicht wurden, erfolgte die Entwicklung von kommerziellen Systemen deshalb erst seit Mitte der 1980er-Jahre. Da die additiven Verfahren verglichen mit anderen Fertigungsverfahren noch relativ jung sind, befinden sich sowohl die Prozesse selbst als auch die verwendeten Bezeichnungen in einem kontinuierlichen Prozess der Weiterentwicklung. Dieses Buch orientiert sich bei der Begriffswahl an den aktuell gebräuchlichen Namen im deutschsprachigen Raum. Alternative Bezeichnungen aus Veröffentlichungen, Normen oder Richtlinien werden bei erster Erwähnung zusätzlich angegeben.

In der Anfangszeit der Additiven Fertigung war die Auswahl an Prozessen und Materialien sehr begrenzt. Prozessstabilität, Bauteiltoleranzen, Oberflächengüte, Festigkeit und Langzeitstabilität der Bauteile waren noch nicht ausreichend für Industrie- oder Endkundenbauteile. Die Verfahren wurden daher primär für die Herstellung von Prototypen eingesetzt. Aus dieser ersten Anwendung ist der Begriff *Rapid Prototyping* entstanden, der sowohl für die Anwendung «schnelle Herstellung von Mustern» als auch für die Gruppe der eingesetzten additiven Fertigungsverfahren verwendet wurde.

Mit der Weiterentwicklung der Verfahren verbesserte sich die Auswahl an Materialien und Prozessen. Additive Fertigung war nun in der Lage, belastbare Bauteile herzustellen, die unter immer anspruchsvolleren Randbedingungen eingesetzt werden konnten. In Anlehnung an das Rapid Prototyping wurden die Begriffe *Rapid Tooling* für die Herstellung von Formen und Werkzeugen und *Rapid Manufacturing* für die direkte Herstellung von Kundenbauteilen eingeführt.

Da diese neuen Anwendungsbereiche der additiven Verfahren nicht mehr zum Begriff des Rapid Prototyping passten, wurde im deutschsprachigen Raum zunächst der Begriff der generativen Fertigungsverfahren eingeführt, der auch in der ersten Ausgabe der VDI-Richtlinie 3404 aus dem Jahr 2009 verwendet wurde. Später wurde die englische Bezeichnung des Additive Manufacturing übernommen und als Additive Fertigung eingedeutscht.

DEFINITION

Der Begriff «Additive Fertigung» unterstreicht zwei wichtige Merkmale der Verfahren: die Herstellung von Bauteilen durch das Hinzufügen von Material und die Eignung als industrielles Fertigungsverfahren. Er hebt sich dadurch vom Begriff des «3D-Drucks» ab, der in den Medien häufig synonym verwendet wird.

Heutzutage existiert eine Vielzahl von additiven Verfahren, die mit unterschiedlichen Wirkprinzipien und Werkstoffen arbeiten. Die Eigenschaften und möglichen Anwendungsgebiete der damit hergestellten Bauteile unterscheiden sich erheblich. Einige Verfahren sind nach wie vor nur zur Fertigung gering belasteter Bauteile geeignet, wie beispielsweise Prototypen oder Gussmodelle für indirekte Prozesse. Andere Verfahren können Bauteile für sicherheitsrelevante Anwendungen mit hohen Belastungen direkt produzieren. Bild 1.2 zeigt eine Übersicht der additiven Fertigungsverfahren *Stereolithografie (SL)*, *Photopolymere Jetting (PJ)*, *Binder Jetting (BJ)*, *Laserschmelzen (SLM)*, *Elektronenstrahlschmelzen (EBM)*, *Fused Deposition Modelling (FDM)*, *Lasersintern (SLS)* und *Material Jetting (MJ)*, geordnet entsprechend ihrem Wirkprinzip und der verarbeiteten Materialien. Dies ist nur eine Auswahl der verbreitetsten Verfahren.

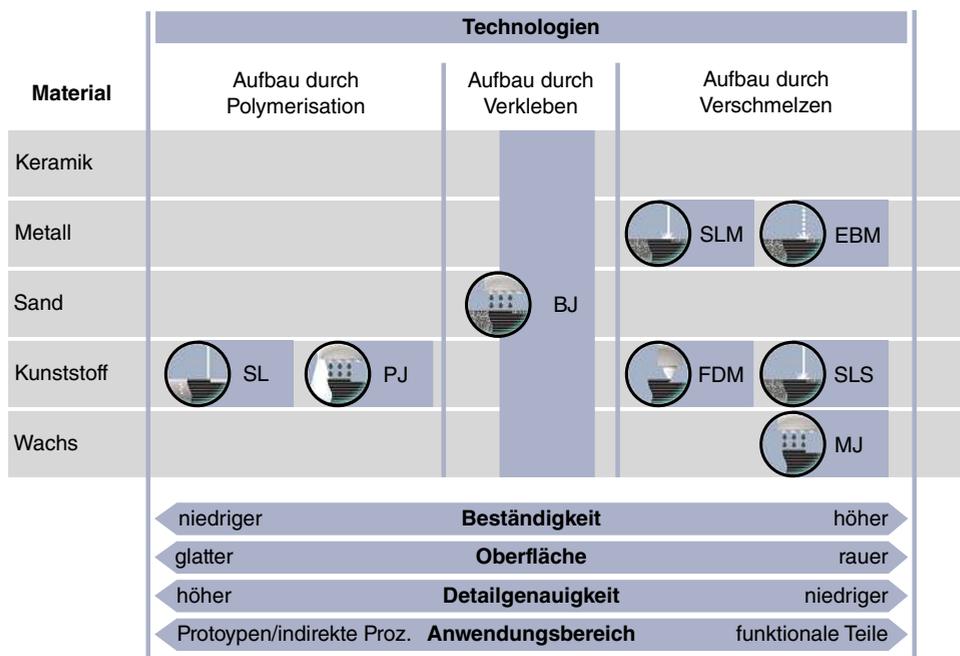


Bild 1.2 Übersicht über Materialien und Wirkprinzip ausgewählter additiver Fertigungsverfahren
[Quelle: Additively AG]

Die Übersicht in Bild 1.2 ist nicht vollständig und dient einer groben Orientierung in der Vielfalt der AM-Verfahren. Gemeinsam ist den additiven Verfahren, dass der Herstellungsprozess ein nahezu beliebig komplexes, dreidimensionales Bauteil in eine Abfolge von einfachen, zweidimensionalen Prozessschritten zerlegt. Die Verarbeitung der einzelnen Schichten erfolgt dabei weitgehend unabhängig von der Form der vorhergehenden oder nachfolgenden Schichten. Die

Prozesszeit wird so nicht mehr von der Komplexität des Bauteils bestimmt, wie z. B. beim Fräsen, sondern im Wesentlichen durch die Bauteilhöhe und das Volumen. Aus Bauteilhöhe und Dicke der einzelnen Schichten ergibt sich die Anzahl der Schichten und damit die Zeit für die Beschichtungsvorgänge während des Baujobs. Das Bauteilvolumen und die Schichtdicke bestimmen, wie groß die Fläche ist, die in den einzelnen Schichten verfestigt werden soll. Diese Unabhängigkeit der Fertigungszeit von der geometrischen Komplexität der Bauteilform ist in Bild 1.3a dargestellt und wird durch das Schlagwort *Complexity for Free* beschrieben.



DEFINITION

Complexity for Free: Große Gestaltungsfreiheit durch die weitgehende Unabhängigkeit der Fertigungskosten von der Bauteilkomplexität.

Der zweite große Unterschied zu konventionellen Fertigungsverfahren sind die im Verhältnis geringen einmaligen Produktionskosten. Die Additive Fertigung erfordert keine bauteilspezifischen Werkzeuge oder Formen. Auch die Vorbereitung der Daten vom 3D-CAD-Modell zu den Schichtinformationen für die Steuerung des Prozesses ist deutlich einfacher und schneller als beispielsweise die Erstellung eines CNC-Programms für eine Fräsmaschine. Dadurch ist die Anfangsinvestition in die Fertigung eines neuen Bauteils geringer als bei anderen Verfahren und die Stückkosten einer Produktion sind weitgehend unabhängig von der produzierten Stückzahl. Es macht also nur einen geringen Unterschied in den Stückkosten, ob beispielsweise 20 identische Teile gefertigt werden oder 20 individualisierte Teile mit ähnlichem Volumen. Demgegenüber sind die wiederkehrenden Kosten pro Bauteil im Allgemeinen höher als in konventionellen Fertigungsverfahren. Aufgrund dieser *Losgrößenunabhängigkeit* ihrer Kostenstruktur eignet sich die Additive Fertigung, wie in Bild 1.3b dargestellt, vor allem für die Herstellung von kleinen Losgrößen und Einzelteilen und weniger für die Massenfertigung von identischen Teilen. Bis zu welcher Stückzahl die Additive Fertigung günstiger ist als eine konventionelle Fertigung, hängt stark vom Bauteil und den eingesetzten Verfahren ab. Kapitel 5 geht ausführlicher auf die Kostenstruktur der Additiven Fertigung ein.



DEFINITION

Losgrößenunabhängigkeit: Größere Flexibilität in der Produktion durch die weitgehende Unabhängigkeit der Stückkosten von der Anzahl der produzierten Bauteile.

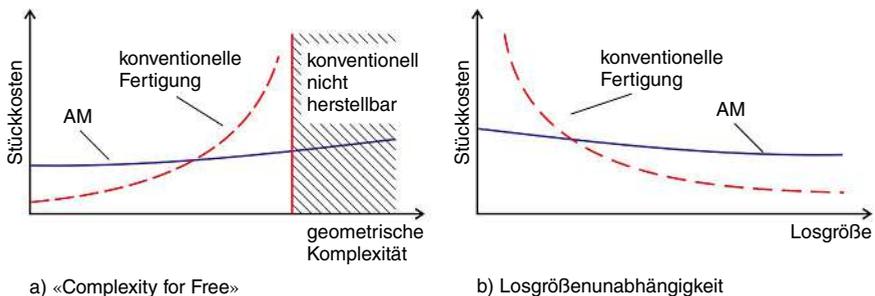


Bild 1.3 Vergleich der Stückkosten bei konventioneller und Additiver Fertigung als Funktion von Bauteilkomplexität und Losgröße [Quelle: ETHZ pd/z]

In den nachfolgenden Abschnitten werden die drei additiven Fertigungsverfahren *Fused Deposition Modelling*, *Lasersintern* und *Laserschmelzen* detaillierter vorgestellt. Diese drei additiven Verfahren haben gegenwärtig die größte Bedeutung in der direkten Herstellung von Industrie- und Endkundenbauteilen.

1.2 Fused Deposition Modelling

Fused Deposition Modelling (FDM) ist ein additives Fertigungsverfahren, bei dem das Bauteil aus einzelnen Kunststoffsträngen aufgebaut wird, indem ein Kunststoffdraht, *Filament* genannt, durch eine beheizte Düse extrudiert wird. Die VDI-Richtlinie VDI 3404 verwendet für diese Verfahren den Begriff *Strangablegeverfahren*, da Fused Deposition Modelling ein eingetragener Markenname der Firma Stratays ist. Wie viele andere AM-Verfahren wurde das FDM-Verfahren in den 1980er-Jahren entwickelt und die grundlegenden Patente für den Prozess sind inzwischen abgelaufen. Da die erforderliche Anlagentechnik für diesen Prozess vergleichsweise simpel ist, existiert nun eine Vielzahl von Maschinen und Bausätzen, die auch für Heimanwender bezahlbar sind. Zudem ist der FDM-Prozess durch die Verwendung von Kunststofffilament als Ausgangsmaterial deutlich sauberer als andere AM-Verfahren, die Pulver oder Flüssigkeiten verwenden. Die günstigen Geräte und die Möglichkeit, diese direkt im Büro oder zuhause zu betreiben, haben erheblich zu der ausgeprägten aktuellen Aufmerksamkeit in den Medien für den 3D-Druck beigetragen.

Bild 1.4 zeigt den Aufbau einer FDM-Anlage. Das Filament befindet sich auf Spulen und wird mit geriffelten Transportrollen in eine beheizte Düse gedrückt. In dieser schmilzt das Filament und der Kunststoff tritt als zähflüssige Schmelze aus der Düse aus. Die Düse wird mit einem x-y-Antrieb über die Bauplattform bewegt und legt die Schmelze als Strang auf dieser ab. Nach jeder Schicht wird die Bauplattform um eine Schichtdicke nach unten verfahren. Für besonders große Bauteile existieren auch Maschinen, bei denen die Bauplattform fest steht und der Düsenkopf nach oben bewegt wird. In professionelleren Maschinen wird der Bauraum beheizt, um eine bessere Verbindung zwischen der Schmelze und den bereits abgelegten Strängen zu erreichen. Da die Düse die Schmelze nicht in der Luft ablegen kann, sondern nur auf festen Strukturen, erfordern Überhänge eine darunterliegende stützende Supportstruktur. Diese Struktur wird als Gitter oder dünne Wand aufgebaut und muss nach dem Bauprozess wieder entfernt werden.

DEFINITION

Fused Deposition Modelling (FDM, dt.: Strangablegeverfahren): Additives Fertigungsverfahren, bei dem ein Kunststofffilament in einer beheizten Düse aufgeschmolzen und extrudiert wird. Die Bauteile werden durch schichtweises Ablegen der Schmelze in dünnen Strängen aufgebaut.



Um das Entfernen der Supportstrukturen zu erleichtern, besitzen höherwertige FDM-Maschinen zwei Düsenköpfe, so dass sie neben dem eigentlichen Baumaterial noch ein zusätzliches Supportmaterial verarbeiten können. Hierfür wird ein Kunststoff gewählt, dessen Schmelztemperatur über der des Baumaterials liegt, damit Bauteil und Stützstruktur nicht miteinander verschmelzen. Besonders vorteilhaft ist es, wenn der Kunststoff des Stützmaterials sich mit einer Flüssigkeit auflösen lässt, die den Bauteilwerkstoff nicht angreift. Dann muss der Support nicht mechanisch entfernt werden, sondern kann in einem Bad aufgelöst werden.

Um den Rand jeder Bauteilschicht wird ein Kunststoffstrang extrudiert. Durch den Strang dieser Konturfahrt fühlt sich die Oberfläche von FDM-Bauteilen entlang der Schichten sehr glatt an, zeigt jedoch ausgeprägte Rillen zwischen den einzelnen Schichten. Da diese Schichten mit 0,1 mm bis

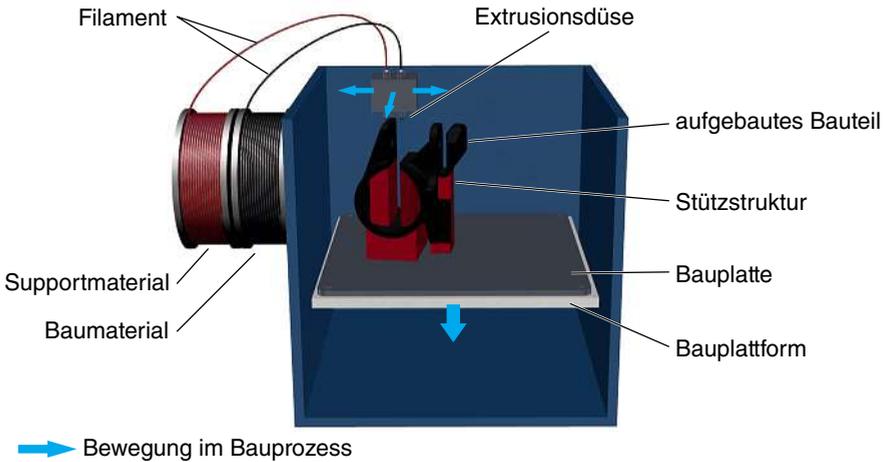


Bild 1.4 Aufbau einer FDM-Anlage [Quelle: ETHZ pd|z]

0,2 mm im Vergleich mit anderen AM-Verfahren recht dick sind, zeigt sich auf geneigten Oberflächen ein ausgeprägter Treppenstufeneffekt (vgl. Bild 1.5). Bauteile aus ABS-Kunststoff lassen sich durch eine Bedampfung mit Aceton nachträglich glätten.

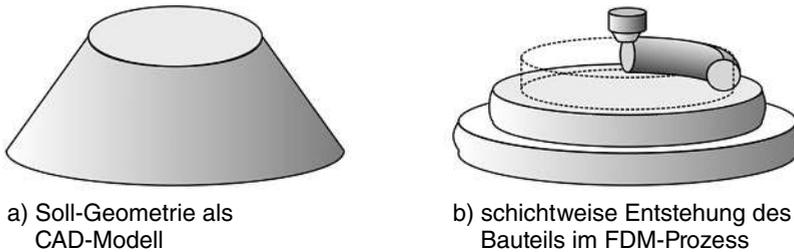


Bild 1.5 Schichtweiser Aufbau eines Bauteils im FDM-Prozess [Quelle: ETHZ pd|z]

ABS-Kunststoff ist momentan das Standardmaterial für den FDM-Prozess. Da es allerdings relativ einfach ist, einen beliebigen Kunststoff zu einem Filament in passendem Durchmesser zu extrudieren, sind auch andere Kunststoffe als Ausgangswerkstoff für FDM-Drucker erhältlich. Neben dem Finden geeigneter Prozessparameter ist die größte Hürde für die Verarbeitung von individuellen Kunststoffen die Tatsache, dass die großen Anlagenhersteller ihr Materialgeschäft mit codierten Materialkassetten schützen.

Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften unterscheiden sich FDM-gefertigte Bauteile deutlich von Bauteilen, die mit konventionellen Verfahren der Kunststoffverarbeitung, wie Spritzguss oder Extrusion, aus dem gleichen Kunststoff hergestellt wurden. Die Festigkeit von Kunststoffen resultiert aus den langen Polymerketten, die in einer zufälligen (amorphen) oder teilweise regelmäßigen (teilkristallinen) Anordnung den Werkstoff ausmachen. Im FDM-Prozess werden Stränge aus Kunststoffschmelze auf bereits erstarrten Kunststoffsträngen abgelegt. Die Wärme der Schmelze reicht nur aus, um an den Kontaktflächen zu dem bestehenden Bauteil eine dünne Randschicht zu erwärmen. Nur in dieser Randschicht erlangen die Polymerketten eine ausreichende Beweglichkeit, um sich mit den Ketten der Schmelze zu verbinden oder zu verschränken. Die Verbindung zwischen den einzelnen Strängen ist entsprechend schwach, verglichen zur

Festigkeit entlang der Stränge. FDM-Bauteile weisen daher eine deutliche *Anisotropie* der mechanischen Eigenschaften auf. Die Festigkeit in Aufbaurichtung z ist deutlich geringer als parallel zur Bauplatte in der x-y-Ebene. Eine höhere Bauraumtemperatur und damit auch eine höhere Temperatur der erstarrten Stränge vergrößern den Bereich, in denen die Ketten beweglich sind, und reduzieren so die Anisotropie.

DEFINITION

Anisotropie: Richtungsabhängigkeit der Werkstoffeigenschaften.



Bild 1.6 zeigt Aufnahmen der Bruchflächen von zwei Proben aus ABS P400. Die Stränge in den einzelnen Schichten sind im rechten Winkel zueinander angeordnet. Die Probe in Bild 1.6a wurde entlang bzw. quer zu den Strängen belastet, während die Belastung der Probe in Bild 1.6b im Winkel von $\pm 45^\circ$ zu den Strängen erfolgte. Im Vergleich der beiden Bruchflächen ist deutlich zu erkennen, dass die Verbindungen zwischen den benachbarten Strängen die Schwachstellen des FDM-Verfahrens sind. Der Bruch der Stränge erfolgte normal zur Strangrichtung und an der Kontaktfläche zwischen den parallelen Strängen.

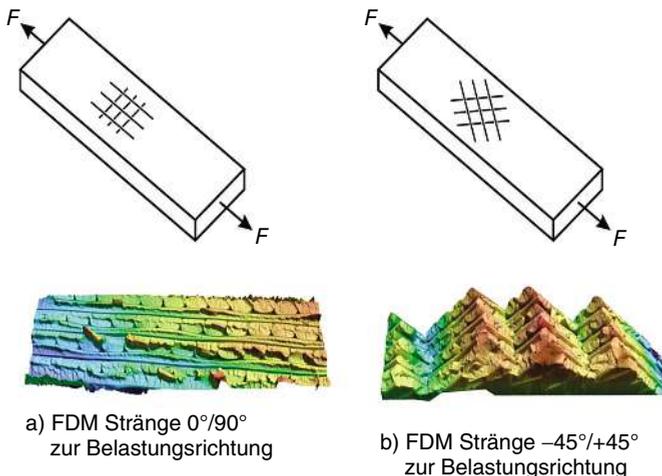


Bild 1.6 Bruchflächen von FDM-Zugproben bei unterschiedlichen Belastungsrichtungen relativ zur Strangrichtung [Quelle: ETHZ pd/z]

Die Füllstrategien beim FDM zielen darauf, eine möglichst geringe Anisotropie zu erreichen. In Aufbaurichtung lässt sich diese bedingt durch den schichtweisen Aufbau der Bauteile nicht vermeiden. Innerhalb der Schichten wird die Fläche meist mit langen durchgehenden Strängen gefüllt, deren Ausrichtung – ähnlich der Proben in Bild 1.6 – zwischen den Schichten variiert. Eine Anpassung der Füllstrategie an die spätere Belastung des Bauteils ist auf kommerziellen Anlagen nicht möglich. Bei diesen bietet die Software für die Datenvorbereitung nur Einstellungen, um den Abstand der Stränge zu erhöhen und durch einen reduzierten Füllgrad die Bauzeit zu verkürzen. Somit zielen diese Maschinen eher auf die schnelle Fertigung von Anschauungsobjekten als auf die Herstellung von funktionalen Bauteilen für Endnutzer.

1.3 Lasersintern

Beim (selektiven) Lasersintern (SLS, engl.: *Selective Laser Sintering*) werden Bauteile aus thermoplastischem Kunststoff entsprechend dem in Bild 1.1 dargestellten Prozess in einem Pulverbett aufgebaut. Das Verfahren wurde Ende der 1970er-/Anfang der 1980er-Jahre entwickelt und in den folgenden Jahren kommerzialisiert. Da die grundlegenden SLS-Patente inzwischen abgelaufen sind, gibt es neben den beiden großen Anlagenherstellern 3D Systems und EOS eine Reihe kleinerer Hersteller von SLS-Anlagen, die lokale Märkte bedienen oder als Startup Nischen erschließen wollen.

Der prinzipielle Aufbau von Lasersinteranlagen ist in Bild 1.7 dargestellt. In industriellen SLS-Anlagen werden CO₂-Laser als Strahlquelle eingesetzt, da die Wellenlänge dieser Laser gut zum Absorptionsspektrum von Kunststoffen passt. Für das Lasersintern ist eine Laserleistung von 50 W ausreichend. SLS-Anlagen für den semiprofessionellen Bereich verwenden teilweise Diodenlaser, da diese kostengünstiger sind und trotz der geringeren Leistung einen Sinterprozess erlauben. Von der Strahlquelle wird der Laser über Spiegel in die Prozesskammer geleitet. Diese ist mit Stickstoff geflutet, um eine Oxidation des Pulvers zu verhindern. Die Steuerung der Temperatur ist sehr wichtig für den Lasersinterprozess, daher sind verschiedene Heizelemente über die Prozesskammer verteilt. Die Oberfläche des Pulverbetts wird mit Infrarotstrahlern beheizt. In den Wänden der Prozesskammer und teilweise auch im Pulvervorratsbehälter sind ebenfalls Heizelemente angebracht.

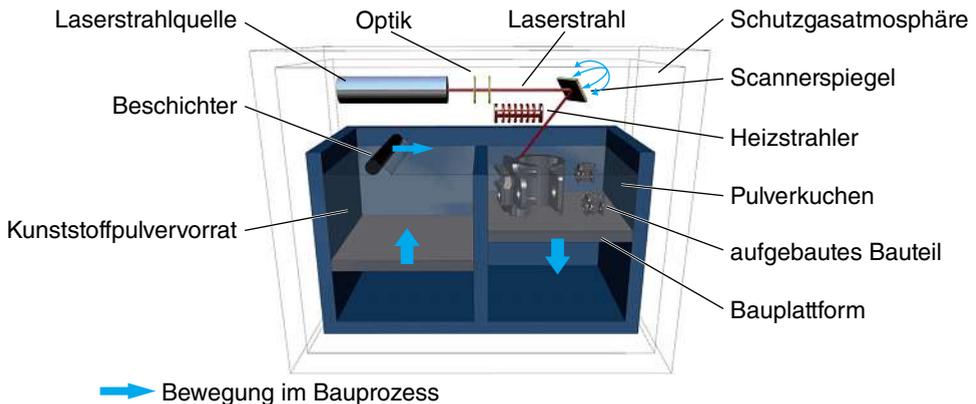


Bild 1.7 Aufbau einer Anlage zum Lasersintern [Quelle: ETHZ pd|z]

Der SLS-Herstellungsprozess erfolgt in einem zyklischen Ablauf. Ein Beschichter holt aus einem vorgeheizten Pulverbehälter Kunststoffpulver und trägt dieses mit einer Klinge oder einer Walze als dünne Schicht auf das Baufeld auf. Infrarotstrahler heizen das Pulver bis kurz unterhalb der Schmelztemperatur auf. Ein Laserstrahl bringt dann die erforderliche Energie ein, um das Pulver gezielt aufzuschmelzen. Nach dieser Belichtung wird die Bauplattform mit dem Pulverbett um eine Schichtdicke abgesenkt und eine neue Schicht aufgetragen. Das Pulver im Bauraum wird dabei weiter über die Wände der Baukammer beheizt und erst nach Ende des Bauprozesses langsam abgekühlt. Durch die hohe Bauraumtemperatur verfestigt sich das Pulverbett zu einem brüchigen Pulverkuchen.

DEFINITION

Lasersintern (SLS, engl.: *Selective Laser Sintering*): Pulverbettbasiertes Additives Fertigungsverfahren, bei dem Kunststoffpulverschichten mit einem Laserstrahl entsprechend der aktuellen Bauteilschicht aufgeschmolzen werden.



Die Kontrolle der Temperatur ist beim Lasersintern von entscheidender Bedeutung für die Stabilität des Fertigungsprozesses und die Qualität der Bauteile. Die Temperatur des Pulvers und der Bauteile sollten sich oberhalb der Kristallisationstemperatur befinden, um Kristallisation und einen daraus folgenden Verzug zu verhindern. Dabei darf die Schmelztemperatur nicht überschritten werden, damit nur die jeweils aktuelle Schicht vom Laser aufgeschmolzen wird. Der Temperaturbereich zwischen Kristallisation und Schmelzen wird als *Sinterfenster* bezeichnet und sollte möglichst groß sein, damit ein Kunststoff prozesssicher verarbeitet werden kann. Während der Belichtung mit dem Laserstrahl darf die Zersetzungstemperatur nicht überschritten werden, da sonst die Polymerketten zerstört werden.

Zu den engen thermischen Randbedingungen für den Kunststoff kommen Anforderungen an die Viskosität der Kunststoffschmelze, die für einen stabilen SLS-Prozess erfüllt sein müssen. Für porenfreie Bauteile mit guten mechanischen Eigenschaften ist es wichtig, dass die Schmelze eine niedrige Viskosität hat und gut mit den umgebenden Partikeln zusammenfließt. Kunststoffschmelzen sind keine newtonschen Fluide, sondern ihre Viskosität nimmt mit steigender Scherung ab. Allerdings wird beim Lasersintern die Schmelze nicht geschert, da die Schmelze keinen Kräften ausgesetzt wird. Daher besteht die Anforderung an den Kunststoff, dass die Schmelze im unbelasteten Zustand eine möglichst niedrige Nullviskosität aufweist.

Diese thermischen und rheologischen Randbedingungen schränken die Auswahl an möglichen Kunststoffen für das Lasersintern erheblich ein. Die Gruppe der amorphen Thermoplaste ist allgemein nicht geeignet, da bei diesen der Fließpunkt variabel ist und von den Verarbeitungsbedingungen abhängt. Hinzu kommt, dass nach dem Schmelzen die Viskosität hoch ist und die Partikel nicht zusammenfließen, sondern nur Sinterhalse zu den benachbarten Partikeln ausbilden. Die mechanischen Eigenschaften von so hergestellten Bauteilen sind entsprechend schlecht. Teilkristalline Thermoplaste sind besser geeignet, da der Phasenübergang von fest nach flüssig direkt beim Erreichen der Schmelztemperatur erfolgt und die Schmelze dünnflüssiger ist.

Die überwiegende Mehrheit der Kunststoffpulver für den Lasersinterprozess sind Polyamide (Nylon). Mit Abstand am häufigsten wird PA12 verarbeitet. Neben dem PA12-Basispulver werden auch Trockenmischungen mit verschiedenen Additiven und Füllstoffen kommerziell angeboten. Weitere SLS-Werkstoffe sind die Polyamide PA6 und PA11, Polypropylen (PP), Polystyrol (PS), Polyetherketon (PEEK) sowie einige wenige thermoplastische Elastomere.

Durch die hohen Temperaturen im Bauprozess verändert sich das Kunststoffpulver und es altert. Einmal benutztes Pulver sollte daher nicht direkt für weitere Baujobs verwendet werden, sondern sollte mit neuem Pulver gemischt werden. Das am besten geeignete Mischungsverhältnis zwischen Altpulver und Neupulver hängt ab vom verwendeten Kunststoff und den Qualitätsansprüchen an die Bauteile. Für PA12 empfiehlt ein Hersteller ein Mischungsverhältnis von 50:50, während PEEK-Pulver nach dem Bauprozess nicht wiederverwendet werden kann. Die Verwendung von Pulver mit einem zu hohen Altpulveranteil führt zu Bauteilen mit schlechter Oberflächenqualität. Durch die Alterung steigt die Schmelzviskosität, die Fließfähigkeit der Schmelze nimmt ab und auf den Bauteilen zeigt sich eine sogenannte Orangenhaut (vgl. Kapitel 4). Die ausschließliche Verwendung von Neupulver liefert zwar eine gute Bauteilqualität, ist allerdings wirtschaftlich nicht sinnvoll. Auch bei guter Auslastung des Bauraums wird nur ein geringer Prozentsatz des Pulvers in der Maschine zu Bauteilen verarbeitet. Ohne eine Wiederverwendung

des Pulvers wären SLS-Bauteile unverhältnismäßig teuer. Die große Preisspanne zwischen unterschiedlichen SLS-Dienstleistern ergibt sich unter anderem aus dem Pulvermischungsverhältnis wie auch der aktuellen Ausnutzung des Bauraums (vgl. Kapitel 5). So mag ein Dienstleister vielleicht in der Lage sein, das angefragte Bauteil noch in einer Lücke zwischen anderen Bauteilen zu platzieren, während ein anderer hierfür die Aufbauhöhe des Baujobs erhöhen muss und dadurch mehr Pulver verbraucht.

Die Möglichkeit, Bauteile im Bauraum übereinander zu platzieren oder ineinander zu verschachteln, ist ein Vorteil des Lasersinterns gegenüber anderen additiven Fertigungsverfahren für Kunststoffe, wie beispielsweise dem Fused Deposition Modelling. Durch die hohe Bauraumtemperatur beim SLS-Verfahren altert nicht nur das Pulver, sondern die Partikel verbacken auch miteinander. Aus dem anfangs fließfähigen Pulver wird ein fester Pulverkuchen, der die Bauteile stützt und während des Bauprozesses fixiert. Stützstrukturen wie beim Fused Deposition Modelling sind daher nicht erforderlich. Dass das Pulver im Lasersinterprozess verbackt, hat allerdings auch einen Nachteil. Die Bauteile können nach dem Bauprozess und dem Abkühlen des Pulverkuchens nicht einfach aus dem Pulver entnommen werden, sondern das anhaftende Pulver muss mit einer Bürste mechanisch entfernt werden. Insbesondere bei komplexen Oberflächen und innenliegenden Strukturen, wie Hohlräumen und Kanälen, kann die Pulverentfernung sehr arbeitsintensiv sein.

1.4 Laserschmelzen

(Selektives) Laserschmelzen (SLM, engl.: *Selective Laser Melting*) ist ein pulverbettbasiertes Verfahren, bei dem ein Metallpulver schichtweise aufgetragen und entsprechend der aktuellen Bauteilschicht mit einem Laserstrahl aufgeschmolzen wird. Der Prozessablauf folgt dabei der Darstellung in Bild 1.1. Er ähnelt dem Lasersintern und ist historisch aus diesem hervorgegangen. Erste Versuche, Metallbauteile schichtweise herzustellen, erfolgten auf Lasersintermaschinen. Da die Laserleistung dieser Maschinen nicht ausreichte, um beispielsweise ein Stahlpulver vollständig aufzuschmelzen, und Laser mit höherer Leistung noch sehr teuer waren, wurden mehrkomponentige Pulver aus einem Werkstoff mit niedrigem Schmelzpunkt und einem Werkstoff mit höherer Festigkeit verwendet. Ein niedrigschmelzender Werkstoff, wie beispielsweise Bronzepulver, diente dabei als Binder und gab den Bauteilen die nötige Stabilität für die nachfolgenden Prozessschritte, bei denen die Festigkeit weiter erhöht wurde. Ab Ende der 1990er-Jahre waren die Kosten von Laserstrahlquellen so weit gesunken, dass erste Systeme entwickelt wurden, die auch einkomponentige Metallpulver verarbeiten konnten. Die Energie des Laserstrahls reicht aus, um das Pulver im Laserfokus vollständig aufzuschmelzen.

Für den Prozess des Laserschmelzens finden sich eine ganze Reihe anderer Bezeichnungen in der Literatur, unter anderem (Selektives) Laserstrahlschmelzen, Direktes Metall-Lasersintern (DMLS, engl.: *Direct Metal Laser Sintering*; Markenname der Firma EOS), *LaserCusing* (Markenname der Firma Concept Laser), *Laser Forming* (Markenname der Firma Trumpf), *Selective Laser Melting* (verwendet von den Firmen SLM Solutions und Realizer) und Lasergenerieren. Aufgrund seiner Historie wird das Verfahren zur Herstellung von Metallteilen in einem Pulverbett mit einem Laserstrahl in frühen Veröffentlichungen auch Lasersintern genannt, da die Laserleistung nicht ausreichte, um das Pulver vollständig aufzuschmelzen. Stattdessen wurde die Oberfläche nur angeschmolzen und durch die Oberflächenspannung der Schmelze bildeten sich Verbindungsbrücken zwischen den Partikeln, die unter dem Mikroskop aussahen wie die Sinterhalse in Keramiken.



DEFINITION

Laserschmelzen (SLM, engl.: Selective Laser Melting): Pulverbettbasiertes additives Fertigungsverfahren, bei dem Metallpulverschichten mit einem Laserstrahl entsprechend der aktuellen Bauteilschicht verschweißt werden.

Technisch gesehen ist das heutige Laserschmelzen ein Laserschweißprozess. Bild 1.8 zeigt den Aufbau einer Anlage zum Laserschmelzen. In der Prozesskammer befindet sich die Bauplattform mit der Bauplatte, die während des Prozesses schrittweise jeweils um eine Schichtdicke nach unten verfahren wird. Die Abmessungen der Bauplattform und der maximale Verfahrenweg abzüglich der Bauplattendicke definieren den verfügbaren Bauraum einer Maschine. Bei einigen Anlagenmodellen wird der Bauraum mit einer Heizung unter der Bauplatte beheizt. Ein Beschichter holt sich aus dem Pulvervorrat eine definierte Menge Pulver und trägt damit eine neue Pulverschicht auf. Überschüssiges Pulver wird im Pulverüberlauf gesammelt. Der Fertigungsprozess läuft immer auf der Ebene des Beschichters ab, da hier der Laserstrahl auf die oberste Schicht des Pulverbetts trifft. Die Prozesskammer über dem Pulverbett ist während des Fertigungsprozesses mit einem Schutzgas – meistens Stickstoff oder Argon – geflutet, da das Metallpulver aufgrund seiner großen Oberfläche entzündlich ist. Der Restsauerstoffgehalt in der Prozesskammer wird mit Sensoren überwacht und sollte deutlich unter 1 % liegen. Düsen leiten das Schutzgas in die Prozesskammer und eine definierte Schutzgasströmung transportiert Schmauch und Schmelzspritzer aus der Bearbeitungszone des Lasers ab und schützt so die Optik. Das Schutzgas wird in einem Kreislauf aus der Prozesskammer durch einen Filter geleitet und strömt dann durch die erwähnten Düsen zurück in die Kammer.

Über der Prozesskammer befindet sich die optische Bank. Der Laserstrahl wird hier geformt und mit einem Scanner über die Prozessebene gelenkt. In dem Scanner befinden sich zwei Spiegel, die mit Galvanometern geschwenkt werden und so den Laserstrahl sehr schnell über die Prozessebene bewegen. Die Fokussiereinrichtung stellt sicher, dass sich der Laserfokus immer auf Höhe des Pulverbetts befindet. Der Abstand zwischen Scanner und Bearbeitungszone ändert sich je nachdem, ob der Laserstrahl auf die Mitte der Prozessebene oder an den Rand gerichtet wird. Anlagen mit einem kleinen bis mittleren Bauraum verwenden hier eine F-Theta-Linse, während bei großen Bauräumen der Laserfokus häufig mit einer Vario-Optik verschoben wird. In der optischen Bank sind auch Sensoren zur Qualitätssicherung untergebracht, die die Laserleistung überwachen bzw. Leuchtintensität und Form des Schmelzpool messen können. Der Laserstrahl wird in der Strahlquelle erzeugt. Üblich sind Nd:YAG-Laser mit einer Wellenlänge von 1064 nm und einer Laserleistung von 200 W bis 1000 W. Bei Fertigungsanlagen mit mehreren Lasern sind die optischen Komponenten mehrfach vorhanden.

Wo der Laserstrahl auf die Oberfläche des Pulverbetts trifft, bildet sich ein kleiner Bereich, in dem das Pulver vollständig aufschmilzt. Am Grund dieses Schmelzpool wird auch die darunterliegende Schicht angeschmolzen und so eine gute Verbindung zwischen den Schichten der Dicke s sichergestellt. Der Scanner bewegt den Laser über das Pulverbett und erzeugt eine durchgehende Schweißraupe. Die wichtigsten Parameter für einen stabilen Prozess sind die Laserleistung P_L und die Scangeschwindigkeit v_s des Laserfokus auf dem Pulverbett bzw. die eingebrachte Streckenenergie

$$E_S = P_L / v_s \cdot s \quad (\text{Gl. 1.1})$$

Übliche Scangeschwindigkeiten bei der Verarbeitung von Stahl-, Aluminium- oder Titanlegierungen in Maschinen mit einem 200-W-Laser sind 600 mm/s bis 800 mm/s. Entsprechend kurz