

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	4
<b>1 Überblick über die additiven Fertigungsverfahren</b> .....	11
1.1 Prinzip der Additiven Fertigung .....	11
1.2 Binder Jetting .....	15
1.3 Fused Deposition Modelling .....	16
1.4 Lasersintern .....	19
1.5 Laserschmelzen .....	21
<b>2 Integration additiver Fertigungsverfahren in die Produktion</b> .....	29
2.1 Direkte Integration der Additiven Fertigung in die Prozesskette .....	29
2.2 Indirekte Integration der Additiven Fertigung in die Prozesskette .....	30
<b>3 3D-Datenerzeugung für additive Fertigungsverfahren</b> .....	35
3.1 Prozesskette der Datenvorbereitung .....	35
3.2 CAD & Tools .....	38
3.3 Dateiformate .....	40
3.3.1 STL .....	40
3.3.2 AMF .....	42
3.3.3 3MF .....	43
3.4 Topologieoptimierung .....	43
3.5 3D-Scannen und Reverse Engineering .....	47
3.5.1 Photogrammetrie .....	48
3.5.2 Streifenlichtscanner .....	48
3.5.3 Laserscanner .....	49
3.5.4 Reverse Engineering .....	50
<b>4 Qualitätssicherung und Kontrolle additiv gefertigter Bauteile</b> .....	51
4.1 Qualitätssicherung während des Fertigungsprozesses .....	51
4.1.1 Fused Deposition Modelling .....	51
4.1.2 Lasersintern .....	53
4.1.3 Laserschmelzen .....	54
4.2 Kontrolle der gefertigten Bauteile .....	56
4.2.1 Zerstörende Prüfung von Fertigungsbegleitproben .....	56
4.2.2 Zerstörungsfreie Prüfung von Bauteilen .....	57
<b>5 Kostenstruktur der Additiven Fertigung</b> .....	65
5.1 Einleitung .....	65
5.2 Kosten bei Eigenfertigung .....	68
5.3 Kosten bei Fremdbezug .....	69
5.4 Lebenszykluskosten .....	71
<b>6 Anwendungsfelder Additiver Fertigung im OEM</b> .....	73
6.1 Einleitung .....	73

6.2	Additive Fertigung als Wertschöpfungstreiber .....	74
6.3	Anwendungsfelder Additiver Fertigung entlang der Wertschöpfungskette .....	75
6.3.1	Prototyping und agile Produktentwicklung .....	77
6.3.2	Verbesserte Produkte durch Additive Fertigung .....	81
6.3.3	Inkrementelle Markteinführung .....	83
6.3.4	Kundenspezifische Produkte: Customization mittels Additiver Fertigung .....	86
6.3.5	Additiv hergestellte Fertigungsmittel .....	90
6.3.6	Flexiblere Auftragsabwicklung .....	93
6.3.7	Rückwärtsintegration durch Additive Fertigung .....	95
<b>7</b>	<b>Auswahl von Bauteilen und Baugruppen für die Additive Fertigung .....</b>	<b>97</b>
7.1	Gründe für die Additive Fertigung .....	97
7.2	Strategische Entscheidungen vor der Bauteilauswahl .....	98
7.3	Vorgehen für die Bauteilauswahl ohne Veränderung der Bauteilform .....	99
7.4	Vorgehen für die Bauteilauswahl mit Veränderung der Bauteilform .....	101
7.4.1	Funktionsintegration .....	102
7.4.2	Performancesteigerung .....	102
7.4.3	Leichtbau .....	103
7.4.4	Kleinserie / Individualisierung .....	104
7.5	Vorgehen bei Neukonstruktionen .....	104
7.6	Prozess zur Identifikation und Beurteilung von Bauteilen .....	105
<b>8</b>	<b>Gestaltungsleitfaden für die Additive Fertigung .....</b>	<b>109</b>
8.1	Aufbau und Struktur des Leitfadens .....	109
8.2	Verfahrensmerkmale der Additiven Fertigung .....	111
8.2.1	Schichtweiser Aufbau .....	111
8.2.2	Treppenstufeneffekt .....	111
8.2.3	Werkstoffe .....	113
8.2.4	Anisotropie .....	113
8.2.5	Eigenspannungen und Verzug .....	115
8.2.6	Supportstrukturen (Stützstrukturen / Hilfsgeometrien) .....	116
8.2.7	Restpulver .....	117
8.2.8	Mögliche Auflösung .....	118
8.3	Verfahrensspezifische Gestaltungsprinzipien .....	119
8.3.1	Funktionsorientierte Gestaltung .....	120
8.3.2	Funktionsintegration .....	124
8.3.3	Frühzeitiges Festlegen der Bauteilorientierung .....	126
8.3.4	Materialminimalismus .....	130
8.3.5	Vermeidung von Stützstrukturen .....	132
8.3.6	Vermeidung von Verzug .....	134
8.3.7	Integrierte Halbzeuge und Komponenten .....	137
8.3.8	Konstruktiver Toleranzausgleich .....	138
8.3.9	Pulverentfernung ermöglichen .....	139
8.3.10	Nachbearbeitung sicherstellen .....	141
8.4	Gestaltungsrichtwerte .....	143
8.4.1	Wanddicke .....	143
8.4.2	Freiwinkel .....	145

8.4.3 Spaltbreite .....	146
8.4.4 Kanaldurchmesser .....	147
8.4.5 Überhang .....	148
8.4.6 Materialkennwerte .....	149
8.5 Erweiterung des Gestaltungsleitfadens durch Unternehmen .....	150
<b>9 Anwendungsbeispiele Additiver Fertigung aus der Industrie .....</b>	<b>155</b>
9.1 Fördertöpfe für Automationstechnik .....	155
9.2 Transparente herausnehmbare Zahnspangen .....	158
9.3 Ionisierer zur Reinigung von Chip-Bonding-Substraten .....	161
9.4 Zahnräder für Tram-Rolldisplays .....	163
9.5 Automatisiertes Zuführsystem für spritzgussgefertigte Steckverbinder .....	165
9.6 Additiv gefertigte Einsätze für CFK-Composite-Rahmen einer Flugdrohne .....	168
9.7 Strukturkomponenten für das «Chairless Chair»-Exoskelett .....	170
9.8 Schleifring mit integrierten elektrischen Leitungen .....	172
9.9 Besseres Hören durch kundenindividuelle Hörgeräte .....	175
9.10 Additiv gefertigte Strömungsmesssonden .....	177
9.11 SLM-Ventilkörper für ein intelligentes Magnetventil für Wasserstofftankstellen ....	180
9.12 Automatisierter Konstruktionsprozess für additiv gefertigte Fertigungsmittel und Vorrichtungen .....	182
9.13 Digitale Prozesskette für Orthesen und Prothesen durch Additive Fertigung und eine Digital Solution .....	184
<b>10 Strategische Implementierung Additiver Fertigung beim OEM .....</b>	<b>187</b>
10.1 Voraussetzungen für die Implementierung .....	187
10.2 Einbindung der Mitarbeiter bei der Implementierung von AM .....	190
10.3 Beschleunigte Entwicklungsprozesse mit AM .....	192
10.4 Beschleunigung des Wissenstransfers durch ETM .....	194
10.4.1 Erster Teil des ETM: Expertise in der Bauteilauswahl .....	195
10.4.2 Zweiter Teil des ETM: Design-Expertise .....	197
<b>Leichtbau – mit 3D-Druck auf die Spitze getrieben .....</b>	<b>199</b>
<b>Abkürzungen .....</b>	<b>209</b>
<b>Lebensläufe .....</b>	<b>210</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>213</b>
<b>Quellenverzeichnis der Bilder .....</b>	<b>220</b>
<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>222</b>

# 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.

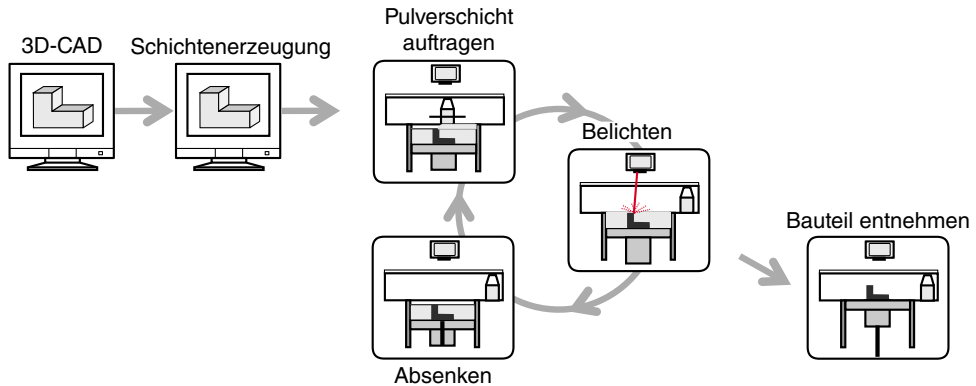
### DEFINITION

**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 1.4 und 1.5 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.

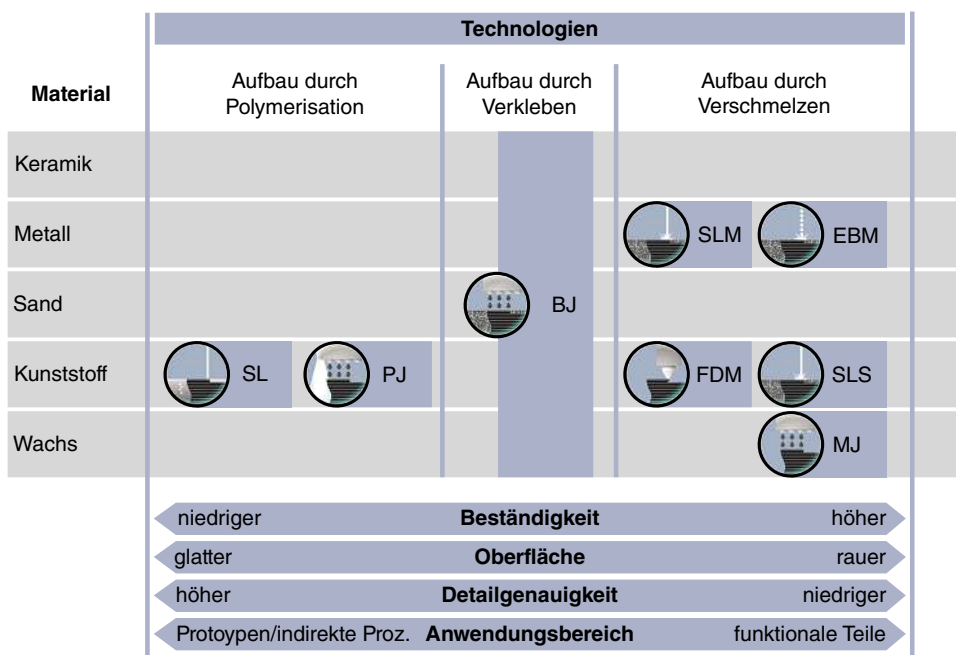
Mit der Weiterentwicklung der Verfahren verbesserte sich die Auswahl an Materialien und Prozessen. Additive Fertigung war nun in der Lage, belastbare Bauteile herzustellen, die unter immer anspruchsvolleren Randbedingungen eingesetzt werden konnten. In Anlehnung an das Rapid Prototyping wurden die Begriffe *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)*, *Laser-schmelzen (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.

i

**DEFINITION**

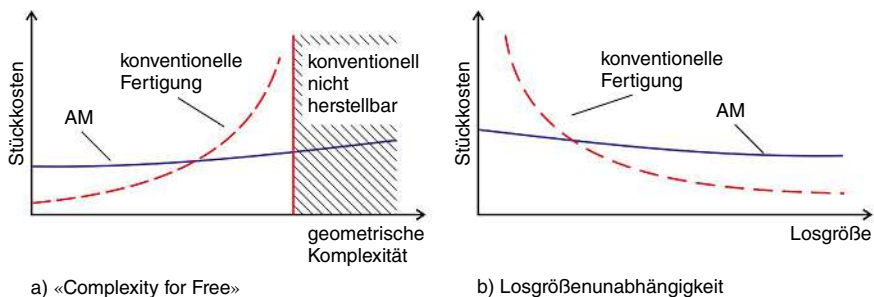
**Complexity for Free:** Große Gestaltungsfreiheit durch die weitgehende Unabhängigkeit der Fertigungskosten von der Bauteilkomplexität.

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.

i

**DEFINITION**

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



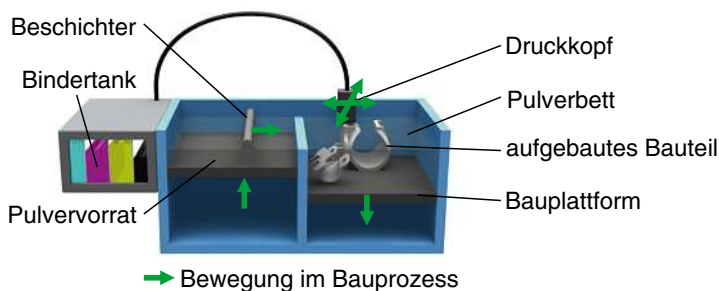
**Bild 1.3** Vergleich der Stückkosten bei konventioneller und Additiver Fertigung als Funktion von Bauteilkomplexität und Losgröße [Quelle: ETHZ pd|z]

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

## 1.2 Binder Jetting

Binder Jetting und verwandte Verfahren sind die additiven Fertigungsverfahren, die einem dreidimensionalen Drucken am nächsten kommen. In der Baukammer werden dünne Schichten eines Pulvers aufgetragen und mit einem Druckkopf wird ein flüssiger Binder gezielt auf die Oberfläche des Pulverbetts aufgebracht. Der aktuelle Normentwurf der DIN EN ISO/ASTM 52900 bezeichnet die Verfahren als Freistrah-Bindemittelauftrag.

Die Funktionsweise des Druckkopfes ist einem klassischen Tintenstrahldrucker für Papier sehr ähnlich. Die aufgebrachte Flüssigkeit stellt dabei direkt oder indirekt den Zusammenhalt der Pulverpartikel her. Die direkte Verbindung der Partikel erfolgt über verschiedene Wirkprinzipien, die den Binder aushärten. Beispiele für derartige Bindersysteme sind Klebstoffe, Photopolymere und geschmolzene Wachse. Ein Beispiel für ein indirektes Zusammenfügen findet sich beispielsweise im Multijet-Fusion-Verfahren von HP für Kunststoffe. Das Verfahren druckt einen Infrarotabsorber in das Kunststoffpulver und bestrahlt es im Anschluss mit Heizstrahlern. Nur in den bedruckten Bereichen wird genügend Infrarotstrahlung absorbiert, um das Kunststoffpulver zu schmelzen. Diese Fügeprozesse erlauben kleine Details und führen zu keinem Verzug der Bauteile.



**Bild 1.4** Aufbau einer Binder-Jetting-Anlage [Quelle: ETHZ pd|z]

### DEFINITION

**Binder Jetting:** Additives Fertigungsverfahren, das – ähnlich einem Tintenstrahldrucker – flüssige Binder in ein Pulverbett druckt. Hierbei können auch mehrere verschiedene Binder parallel aufgebracht werden.



Durch eine geeignete Wahl von Pulverwerkstoff und Bindemitteln lässt sich eine große Bandbreite an Material- und Bauteileigenschaften realisieren. Dieser Vorteil des Verfahrens ermöglicht vollfarbige Anschauungsmodelle und Prototypen mit sehr unterschiedlichen Steifigkeiten. Die Festigkeit und Lebensdauer der Bauteile werden primär durch die Klebeverbindung zwischen den Partikeln bestimmt. Die kommerzielle Bedeutung des Binder Jettings lag daher in der Vergangenheit vor allem im Prototyping.



In der Fertigung von Endkundenbauteilen wurde Binder Jetting vor allem zur Herstellung von verlorenen Formen und Modellen für Urformverfahren genutzt. Zu dieser indirekten Integration in die Prozesskette (vgl. Abschnitt 2.2) sind in den letzten Jahren weitere Systeme für die direkte Fertigung von Endkundenbauteilen in einem mehrstufigen Prozess hinzugekommen. Mittels Binder Jetting lassen sich Bauteile aus zusammengeklebten Metall- oder Keramikpartikeln herstellen. In weiteren Prozessschritten werden der Binder entfernt und die Bauteile ähnlich einem Grünling gesintert. Dieser Teil der Prozesskette ähnelt den bekannten Prozessen bei der Verarbeitung von technischen Keramiken, Hartmetallen und dem MIM (*metal injection molding*). Die erreichbaren Eigenschaften und Bauteildichten sind daher ähnlich. Allerdings ist auch zu beachten, dass ein Sinterschwund von bis zu 30% üblich ist. Diese Schrumpfung muss in der Konstruktion und in der Baujobvorbereitung berücksichtigt werden.

Ein weiteres Anwendungsfeld für Binder Jetting sind die Biotechnologie und Medizin. Das Verfahren ist vergleichsweise schonend zu den verarbeiteten Werkstoffen. Diese werden im Prozess keinen großen Drücken und Scherkräften ausgesetzt und für die Aushärtung des Binders sind keine erhöhten Temperaturen erforderlich. Somit lassen sich auch sensible Werkstoffe wie lebende Zellen, Medikamente oder Nahrungsmittel verarbeiten, ohne diese zu schädigen.

Inwieweit sich diese Verfahren in der industriellen Anwendung durchsetzen, ist noch nicht abzusehen. Den Vorteilen eines schnellen Druckprozesses mit geringer Materialschädigung und ohne Verzug steht eine mehrstufige Prozesskette gegenüber. Jeder Schritt in dieser Prozesskette erfordert die notwendige Infrastruktur und Erfahrung und birgt das Risiko von Prozessfehlern.

### 1.3 Fused Deposition Modelling

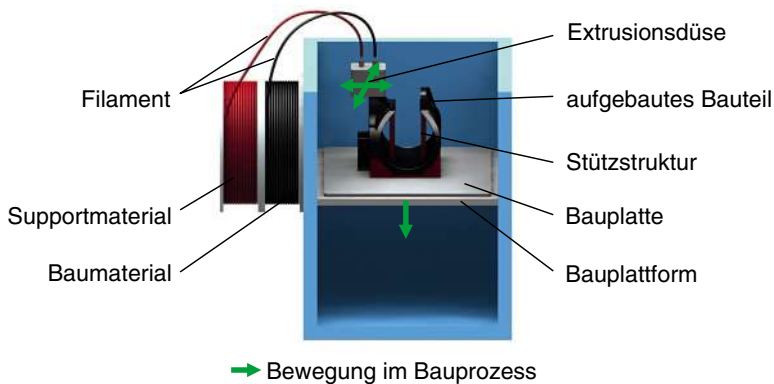
Fused Deposition Modelling (FDM) ist ein additives Fertigungsverfahren, bei dem das Bauteil aus einzelnen Kunststoffsträngen aufgebaut wird, indem ein Kunststoffdraht, *Filament* genannt, durch eine beheizte Düse extrudiert wird. Die VDI-Richtlinie VDI 3405 verwendet für diese Verfahren den Begriff *Strangablegeverfahren*, da Fused Deposition Modelling ein eingetragener Markenname der Firma Stratasys 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 1.5 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**

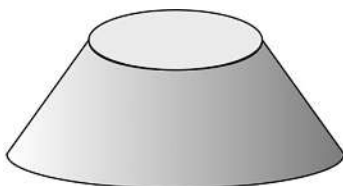
**Fused Deposition Modelling** (FDM, dt.: Strangablegeverfahren): Additives Fertigungsverfahren, bei dem ein Kunststoff filament in einer beheizten Düse aufgeschmolzen und extrudiert wird. Die Bauteile werden durch schichtweises Ablegen der Schmelze in dünnen Strängen aufgebaut.

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.

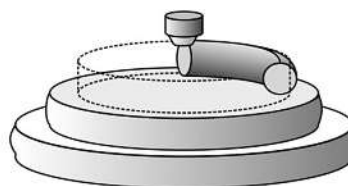


**Bild 1.5** Aufbau einer FDM-Anlage [Quelle: ETHZ pd|z]

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 0,2 mm im Vergleich mit anderen AM-Verfahren recht dick sind, zeigt sich auf geneigten Oberflächen ein ausgeprägter Treppenstufeneffekt (vgl. Bild 1.6). Bauteile aus ABS-Kunststoff lassen sich durch eine Bedampfung mit Aceton nachträglich glätten.



a) Soll-Geometrie als CAD-Modell



b) schichtweise Entstehung des Bauteils im FDM-Prozess

**Bild 1.6** 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.

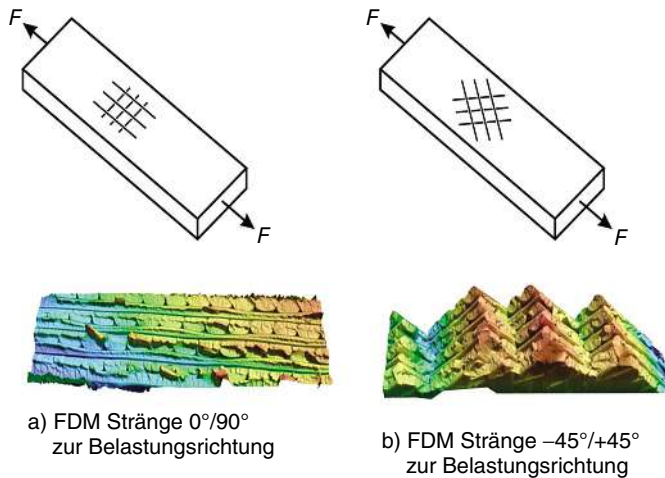


#### DEFINITION

**Anisotropie:** Richtungsabhängigkeit der Werkstoffeigenschaften.

Bild 1.7 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 1.7a wurde entlang bzw. quer zu den Strängen belastet, während die Belastung der Probe in Bild 1.7b 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.

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 1.7 – 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.



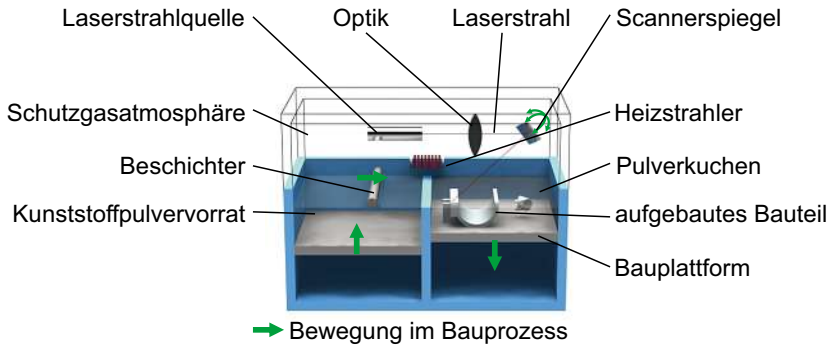
**Bild 1.7** Bruchflächen von FDM-Zugproben bei unterschiedlichen Belastungsrichtungen relativ zur Strangrichtung [Quelle: ETHZ pd/z]

## 1.4 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.

Der prinzipielle Aufbau von Lasersinteranlagen ist in Bild 1.8 dargestellt. In industriellen SLS-Anlagen werden  $\text{CO}_2$ -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 Pulvorratsbehälter sind ebenfalls Heizelemente angebracht.

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 Bauplatzform 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.



**Bild 1.8** Aufbau einer Anlage zum Lasersintern [Quelle: ETHZ pd|z]

**i**

**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 Sinterhälse 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.

## 1.5 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. In der englischsprachigen Normung von ISO und ASTM hat sich die Bezeichnung Laser-based Powder Bed Fusion of metals (L-PBF/M) durchgesetzt. 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.

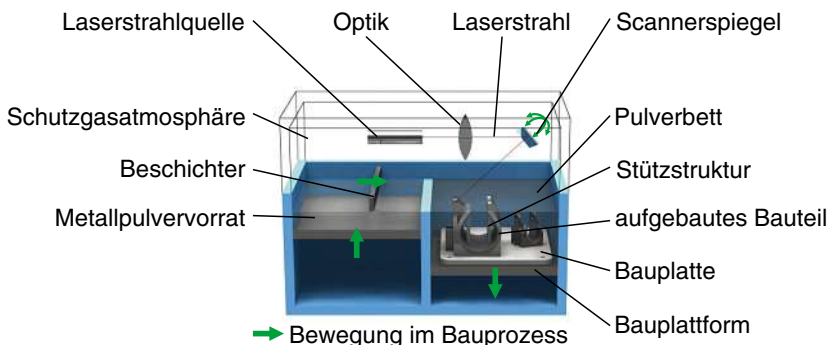
Für den Prozess des Laserschmelzens finden sich eine ganze Reihe anderer Bezeichnungen in der Literatur. Aufgrund seiner Historie wird das Verfahren zur Herstellung von Metallteilen in einem Pulverbett mit einem Laserstrahl in frühen Veröffentlichungen auch Lasersintern genannt, da die Laserleistung 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 1.9 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 Verfahrensweg 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.



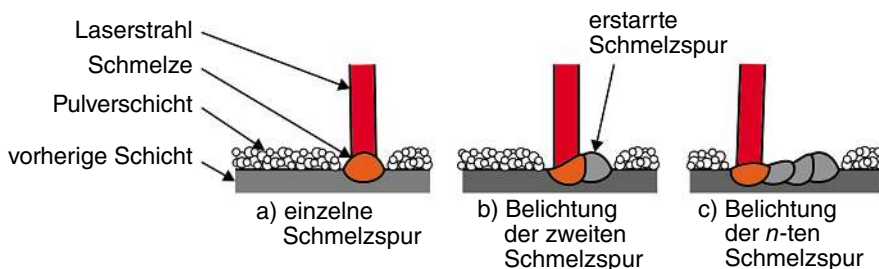
**Bild 1.9** Aufbau einer Anlage zum Laserschmelzen [Quelle: ETHZ pd|z]

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 Schweißbraupe. Die wichtigsten Parameter für einen stabilen Prozess sind die Laserleistung  $P_L$  und die Scangeschwindigkeit  $v_s$  des Laserfokus auf dem Pulverbett. Die Streckenenergie in Gl. 1.1 ist ein gutes Modell, um sich das Zusammenspiel der Parameter vor Augen zu führen. Die Aussagefähigkeit der Streckenenergie ist allerdings sehr begrenzt, da bei gleicher Streckenenergie sehr unterschiedliche Prozess- und Bauteileigenschaften auftreten können.

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

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 ist die Zeit, in der das Pulver aufgeschmolzen wird und wieder erstarrt. Durch die Oberflächenspannung der Schmelze zieht sich diese zusammen. Damit dies keine negativen Auswirkungen auf die Prozessstabilität und die Festigkeit der Bauteile hat, sollte sich die erstarrte Schmelze an bestehende feste Strukturen anlegen können. Bei einer einzelnen Schmelzspur zieht sich die Schmelze, wie in Bild 1.10 gezeigt, zusammen. Dies kann dazu führen, dass sie nach oben aus dem umgebenden Pulverbett herausragt. Um den Schmelzpool zu stabilisieren und diese Spurüberhöhung zu verhindern, werden nachfolgende Spuren mit einem leichten Überlapp platziert, damit sich die neue Schmelzspur an bereits erstarrte Spuren anlegen kann.



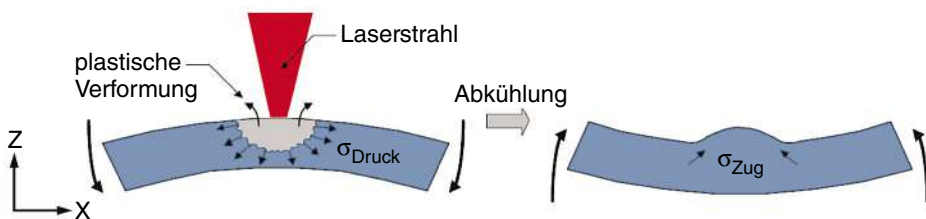
**Bild 1.10** Stabilisierung der Schmelze durch Anlegen an bereits erstarrte Schmelzspuren

[Quelle: KLAHN 2015 nach YADROITSEV, SMUROV 2011]



Beim Laserschmelzen wird, anders als beim Lasersintern, nahezu die gesamte Energie über den Laserstrahl in die Bearbeitungszone eingebracht. Dies führt zu starken Temperaturunterschieden auf kleinstem Raum. Durch die beiden im Folgenden beschriebenen Mechanismen können thermische Eigenspannungen im Bauteil entstehen und zu einem Verzug führen.

Der Temperatur-Gradienten-Mechanismus tritt bei lokaler Energieeinbringung auf und ist in Bild 1.11 skizziert. Durch den Laserstrahl erwärmt sich der Werkstoff und dehnt sich lokal aus. Dies erzeugt Druckspannungen im umgebenden Material. In der Wärmeeinflusszone reduziert sich durch die hohe Temperatur die Fließspannung und die entstandenen Spannungen werden teilweise durch plastische Verformung abgebaut. Wenn sich nun das Material wieder abkühlt, zieht es sich zusammen und es entstehen Zugspannungen, die das Bauteil in Aufbaurichtung verziehen.

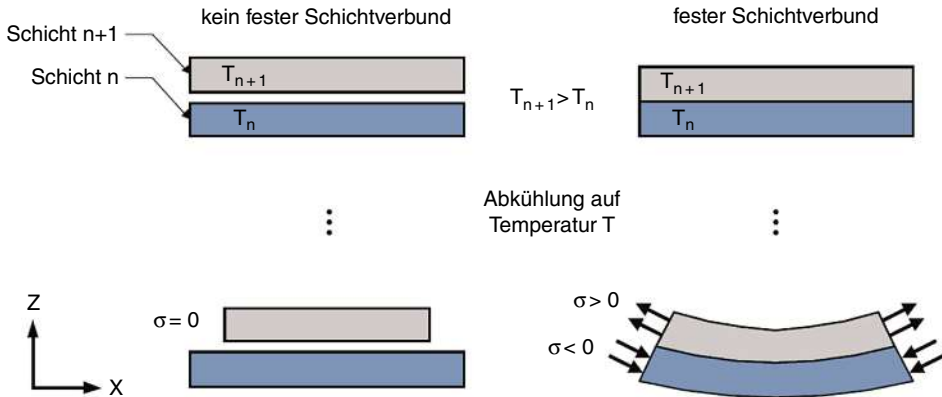


**Bild 1.11** Bauteilverzug durch den Temperatur-Gradienten-Mechanismus  
[Quelle: MUNSCH 2013 nach VOLLERTSEN 1996]

Auch abkühlungsbedingtes Schrumpfen kann zu einem Verzug des Bauteils in Aufbaurichtung führen. Bild 1.12 zeigt diesen Mechanismus anhand der Gegenüberstellung von Bauteilschichten mit und ohne feste Verbindung. Der bereits gefertigte Teil eines Bauteils hat in etwa die Temperatur des Bauraums. Beim Fertigen der nächsten Schicht wird das Pulver entsprechend der aktuellen Bauteilschicht mit dem Laserstrahl aufgeschmolzen. Hat diese neue Schicht keine Verbindung zum bestehenden Bauteil, kann sie beim Abkühlen ungehindert schrumpfen. Da die Schichten beim Laserschmelzen miteinander verbunden sind, behindert das bereits gefertigte Bauteil das Schrumpfen und es entstehen Zug- und Druckspannungen, die zu einem Verzug in Aufbaurichtung führen.

Beide Mechanismen sind von den thermischen und mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs abhängig. Es gibt Werkstoffe, die weniger verzugsanfällig sind (z. B. Aluminiumlegierungen), und anspruchsvollere Werkstoffe (z. B. Titanlegierungen), bei denen besonderes Augenmerk auf die Eigenspannungen gerichtet werden sollte.

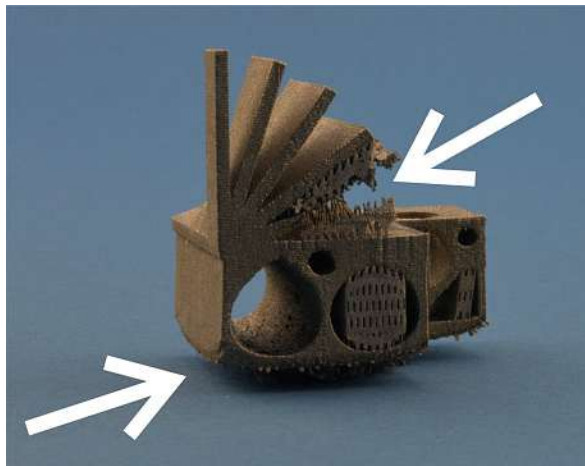
Eigenspannungen können bereits während des Bauprozesses zu einer Verformung des Bauteils führen und dadurch Prozessabbrüche provozieren. Es ist deshalb ausgesprochen wichtig, die Bauteile während der Fertigung durch eine Anbindung an die Bauplattform zu fixieren. Dies geschieht mit Supportstrukturen, die im Prozess als Gitter gemeinsam mit dem Bauteil aufgebaut werden. Sie verbinden überhängende Bauteilbereiche mit der Bauplatte und verhindern dadurch einen Verzug in Aufbaurichtung. Nach dem Bauprozess wird die Platte mit dem gefertigten Bauteil einer Wärmebehandlung unterzogen, um die Eigenspannungen abzubauen. Erst nach dem Spannungsarmglühen kann das Bauteil ohne Verformung von der Platte getrennt werden. Bild 1.13 zeigt ein Musterbauteil aus dem Edelstahl 1.4404 mit verschiedenen Überhängen. Bei dem flachen Überhang war der Support nicht ausreichend und ist an der markierten Stelle durch die



**Bild 1.12** Bauteilverzug durch das Abkühlen der Schichten [Quelle: MUNSCH 2013 nach MEINERS 1999]

Eigenspannungen gebrochen. Die überhängende Wand hat sich in Aufbaurichtung verzogen (vgl. Kapitel 8). Die Unterseite des Bauteils hat sich von dem Support zur Bauplatte gelöst und in Aufbaurichtung verzogen.

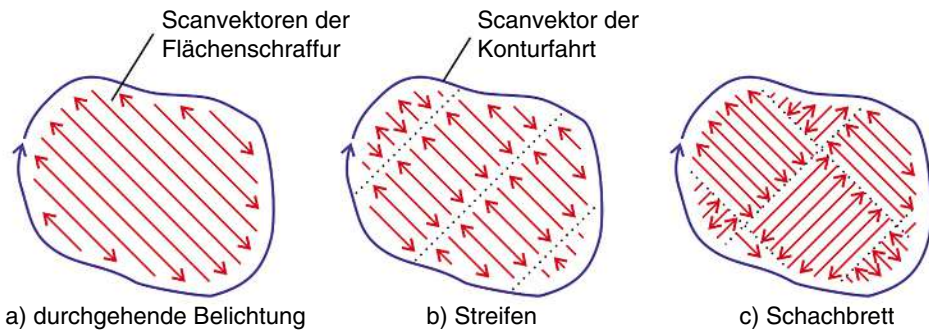
Ein weiterer Grund für den Einsatz von Supportstrukturen ist die hohe Fließfähigkeit des Metallpulvers, durch die ein Bauteil ohne feste Verbindung zur Bauplatte leicht im Pulverbett versinkt oder beim Auftragen einer neuen Pulverschicht verschoben wird.



**Bild 1.13** Überhängende Wände mit Supportstrukturen, die teilweise versagt haben [Quelle: ETHZ pd[z]]

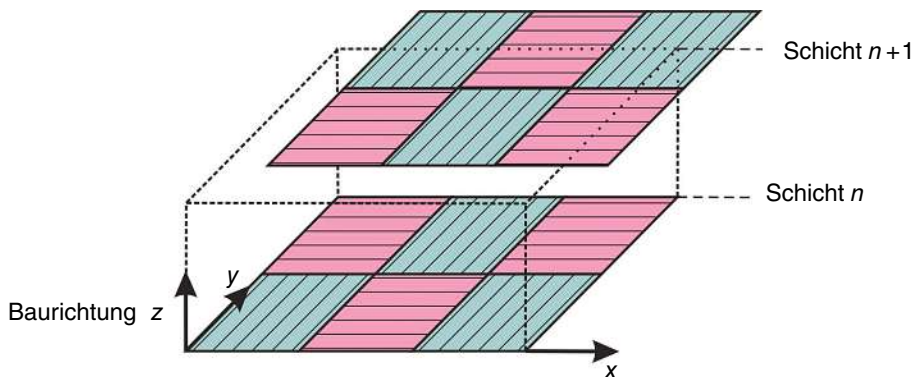
Für einen stabilen Bauprozess und einen geringen Verzug der Bauteile ist es wichtig, die Bildung thermischer Eigenspannungen bereits während des Bauprozesses zu reduzieren. Eine wesentliche Maßnahme ist es, die zugeführte Energie gleichmäßiger in das Bauteil einzubringen. Ähnlich dem schrittweisen Schweißen von langen Schweißnähten an großen Bauteilen, wird die zu belichtende Fläche in viele kurze Scanvektoren aufgeteilt. Die empfohlene Anordnung der

Scanvektoren unterscheidet sich dabei je nach Anlagenhersteller. Im Allgemeinen wird eine Belichtung mit durchgehenden Scanvektoren, wie in Bild 1.14a dargestellt, nicht empfohlen, da die sehr langen Schmelzspuren zu hohen Spannungen entlang der Bahnen führen. Stattdessen wird die zu belichtende Fläche in Streifen (Bild 1.14b) oder Rechtecke im Schachbrettmuster (Bild 1.14c) unterteilt, die dann mit Vektoren gleicher Länge gefüllt werden. Die Belichtung der Schachbrettfelder kann in einer zufälligen Reihenfolge geschehen, um die Energie noch weiter verteilt in das Bauteil einzubringen. Für eine bessere Oberflächenqualität wird noch eine durchgehende Schmelzspur um den Rand der belichteten Fläche aufgeschmolzen. Diese Konturfahrt deckt die Anfänge und Enden der Schmelzspuren der Flächenschraffur ab und kann mit anderen Prozessparametern erfolgen, damit weniger Pulverpartikel an der Bauteiloberfläche anhaften.



**Bild 1.14** Unterschiedliche Belichtungsmuster zum Füllen einer Schicht mit Schmelzspuren [Quelle: KLAHN 2015]

Das Belichtungsmuster der Schichten wird variiert, um gleichmäßigere Materialeigenschaften in allen Raumrichtungen zu erreichen. Außerdem besteht an den Anfangs- und Endpunkten der Schmelzspuren ein erhöhtes Risiko für Fehlstellen. Durch die Variation des Musters wird erreicht, dass die Fehlstellen nicht gehäuft in einer Bauteilregion auftreten und Poren beim Aufschmelzen der nachfolgenden Schicht geschlossen werden. Bild 1.15 zeigt solch eine Variation des Belichtungsmusters am Beispiel eines Schachbrettmusters, bei dem die Position der Felder verschoben wird und zusätzlich die Richtung der Schraffur in den Feldern um  $90^\circ$  gedreht wird.



**Bild 1.15** Variation des Belichtungsmusters zwischen zwei Schichten [Quelle: KLAHN 2015]

Mit den vorgestellten Belichtungsstrategien wird eine relative Bauteildichte von über 99 % erreicht, bezogen auf eine porenfreie Probe aus dem gleichen Material. Die thermischen Eigenspannungen werden durch eine geeignete Belichtungsstrategie zwar reduziert, können allerdings nicht vollständig vermieden werden.

Bei vielen Laserschmelzanlagen bieten die Hersteller als Option eine Bauraumheizung an. Bei den entsprechenden Modellen sind unter der Bauplatte und teilweise auch in den Wänden des Bauraums elektrische Heizungen eingebaut. Diese heizen das Bauteil und das Pulverbett bei den meisten Anlagen auf 200 °C bis 250 °C und reduzieren so den Temperaturunterschied zwischen der Bearbeitungszone und dem restlichen Bauteil. Durch den geringeren Temperaturgradienten entstehen auch weniger Eigenspannungen. Bauraumheizungen für 500 °C und mehr sind ebenfalls auf dem Markt verfügbar. Der Vorteil solch hoher Bauraumtemperaturen ist, dass die Bauteile bereits im Prozess spannungsarm gegläht werden. Damit kann nicht nur die Entstehung von Eigenspannungen reduziert, sondern diese auch abgebaut werden. Die Nachteile liegen in einem deutlich erhöhten Aufwand bei der Anlagenentwicklung, da die Maschine über einen großen Temperaturbereich gasdicht sein muss, sowie in längeren Rüstzeiten für das Aufheizen und Abkühlen der Prozesskammer.

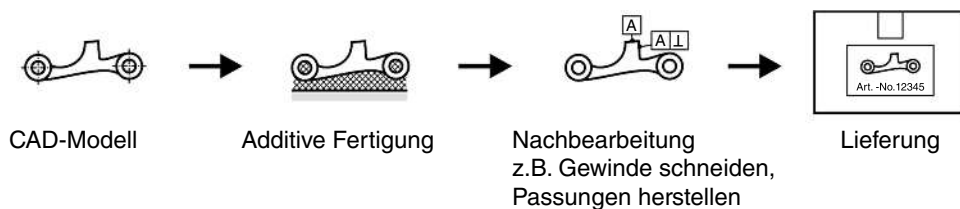


## 2 Integration additiver Fertigungsverfahren in die Produktion

Bei der Herstellung von Produkten sind additive Fertigungsverfahren häufig nur ein Produktionsschritt in einer längeren Prozesskette. Dabei kann entweder eine Teilgeometrie additiv gefertigt und gemeinsam mit vor- und nachgelagerten Prozessen zum finalen Bauteil bearbeitet werden, oder das additiv gefertigte Bauteil ist als Fertigungsmittel indirekt an der Produktentstehung beteiligt. In diesem Kapitel werden bekannte Verfahrenskombinationen vorgestellt.

### 2.1 Direkte Integration der Additiven Fertigung in die Prozesskette

Bei einer direkten Integration von AM-Bauteilen ist das additiv gefertigte Bauteil Bestandteil des finalen Produkts. In Bild 2.1 ist eine vereinfachte Prozesskette zur direkten Herstellung von Produkten skizziert.



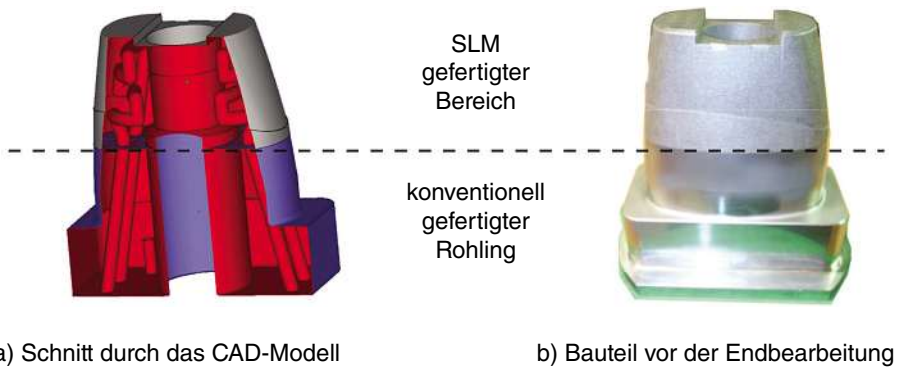
**Bild 2.1** Prozesskette zur direkten Herstellung von Bauteilen mittels Additiver Fertigung [Quelle: ETHZ pd|z]

Im einfachsten Fall einer direkten Integration wird das Bauteil additiv gefertigt, an den erforderlichen Stellen konventionell nachbearbeitet und ist dann fertig. In einer solchen Prozesskette ist das additiv gefertigte Bauteil vergleichbar mit einem Gussrohling, der ebenfalls häufig noch weiter bearbeitet wird. Der Konstrukteur kann die Nachbearbeitung erleichtern, indem er beispielsweise Spannflächen und Referenzpunkte in das Bauteildesign einbringt. Auch sollte er das Aufmaß für die Nachbearbeitung möglichst gering halten, indem er beispielsweise bei Gewinden bereits das Kernloch in der AM-Konstruktion vorsieht, so dass bei der Nachbearbeitung nur noch der Gewindeschneider zum Einsatz kommen muss.

Bei Verfahren, bei denen das Bauteil auf eine Bauplattform aufgebaut wird, kann diese für eine leichtere Nachbearbeitung genutzt werden. So entfällt beispielsweise die Notwendigkeit von aufwendigen Spannhilfen, wenn das Bauteil erst nach der Zerspanung von der Bauplatte getrennt wird, da diese sehr einfach in einer Werkzeugmaschine befestigt werden kann. Befinden sich mehrere Bauteile auf der Bauplatte, können diese nacheinander in einer Aufspannung bearbeitet werden, was die Rüstzeiten deutlich reduziert. Um dieses Vorgehen zu ermöglichen, muss die Nachbearbeitung bereits in der Konstruktion berücksichtigt werden.

Konventionelle Verfahren können nicht nur bei der Nachbearbeitung additiv gefertigter Bauteile zum Einsatz kommen, sondern auch für die Herstellung von Halbzeugen, auf die dann ein

additiver Bereich aufgebaut wird. Das bekannteste Beispiel hierfür sind sogenannte hybride Werkzeugeinsätze für Spritzgussformen. Bei diesen wird nicht der komplette Werkzeugeinsatz additiv hergestellt, sondern nur der Bereich mit der komplexen Werkzeugoberfläche mit einer darunter liegenden konturnahen Kühlung wird mittels Laserschmelzen auf ein vorgefertigtes Frästeil aufgebaut. Bild 2.2 zeigt einen hybriden Werkzeugeinsatz im CAD-Modell und als Bauteil vor der Endbearbeitung. In diesem Beispiel werden im Vergleich mit einem komplett additiv gefertigten Einsatz Produktionskosten eingespart, da ein Großteil des Bauteilvolumens mit günstigen konventionellen Prozessen hergestellt wird, während das vergleichsweise teure SLM-Verfahren nur für komplexe Bereiche eingesetzt wird, die konventionell nicht herstellbar wären. Ein anderer Grund für hybride Bauteile ist die Möglichkeit, unterschiedliche Werkstoffe miteinander zu kombinieren. Hierbei ist jedoch zu beachten, ob sich die beiden Werkstoffe miteinander verschweißen lassen.



**Bild 2.2** Hybrider Werkzeugeinsatz aus konventionellem Grundkörper und laseradditivem Bereich  
[Quelle: ETHZ pd|z]

Neben dem Einsatz von anderen Prozessen vor und nach der Additiven Fertigung ist es auch möglich, andere Komponenten während des Bauprozesses in das Bauteil einzubringen. Der Bauprozess kann an einer definierten Schicht unterbrochen werden, um andere Bauteile, Sensoren oder RFID-Chips in eine Öffnung zu legen, die dann beim Fortsetzen des Baujobs von den folgenden Schichten verschlossen wird.

## 2.2 Indirekte Integration der Additiven Fertigung in die Prozesskette

In einer Fertigungsprozesskette können additive Verfahren nicht nur zur direkten Herstellung von Bauteilen eingesetzt werden. Es ist ebenfalls möglich, Fertigungsmittel und Formen herzustellen, die für die konventionelle Herstellung der Bauteile erforderlich sind, wie in Bild 2.3 skizziert. Eine derartige Kombination von Verfahren nutzt Vorteile der Additiven Fertigung, ohne dass große Änderungen in einer bestehenden Prozesskette notwendig sind.

Bei Urformverfahren haben sich die additiven Fertigungsverfahren bereits in verschiedenen Einsatzmöglichkeiten bewährt. Bereits seit Anfang der 2000er-Jahre werden mit dem