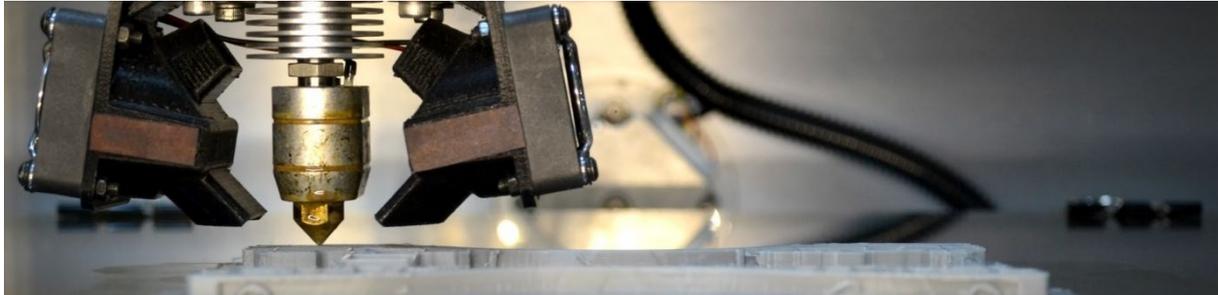


---

## Wirtschaftliche Additive Fertigung - Rahmenbedingungen und Entscheidungshilfen

---



### Zusammenfassung

---

Es existiert eine Vielzahl additiver Fertigungsverfahren, die auf variierenden Prozessprinzipien basieren. Zum Beispiel werden Werkstoffe in einem Pulverbett laserbasiert verschmolzen, lichtreaktive Photopolymere härten bei entsprechender Bestrahlung zielgerichtet aus und extrudierte Kunststoffe werden mit einer Absetzdüse verarbeitet. Die Verfahren unterscheiden sich in Bezug auf die erzielbaren mechanischen und geometrischen Eigenschaften, die verarbeitbaren Materialien sowie die Prozessgeschwindigkeiten. Des Weiteren sind unterschiedliche Nachbearbeitungsschritte erforderlich, die Sicherheitsanforderungen variieren und die Kostenstrukturen sind verschieden. Die Anschaffungskosten für Anlagen im Bereich des Fused Deposition Modeling (FDM) und der Stereolithografie (SLA) können erheblich geringer sein als die Kosten von Anlagen zur pulverbasierten additiven Fertigung. Abhängig vom Budget, den räumlichen Begebenheiten im Unternehmen, der zu erwartenden Stückzahl und den Anforderungen an die Erzeugnisse können Fertigungsdienstleister eine gute Alternative zu einer additiven Eigenfertigung sein.

### Einleitung

---

Gegenüber herkömmlichen Technologien ist ein wesentlicher Vorteil der additiven Fertigungsverfahren, dass Bauteile mit komplexer Geometrie auf Basis von Datenmodellen ohne weitere Investitionen in Anlagen oder Werkzeuge direkt hergestellt werden können. Viele Unternehmen möchten in den nächsten Jahren additive Fertigungsverfahren in ihre Geschäftsprozesse integrieren. Zum Teil kennen Unternehmen die Vorteile der additiven Fertigung und können bereits Prototypen oder Funktionsbauteile identifizieren, die für den 3D-Druck geeignet sind. Der Weg zur operativen Umsetzung von wirtschaftlichen Druckprozessen ist ihnen jedoch nicht immer klar. Daher wird in den folgenden Kapiteln dargestellt, in welcher Form sich die unterschiedlichen additiven Fertigungsverfahren voneinander unterscheiden beziehungsweise was ihre Stärken und Schwächen sind. Außerdem werden Kostenstrukturen für weit verbreitete Verfahren dargelegt und es wird analysiert, in welchen Fällen ein Fremdbezug der additiven Eigenfertigung vorzuziehen ist.

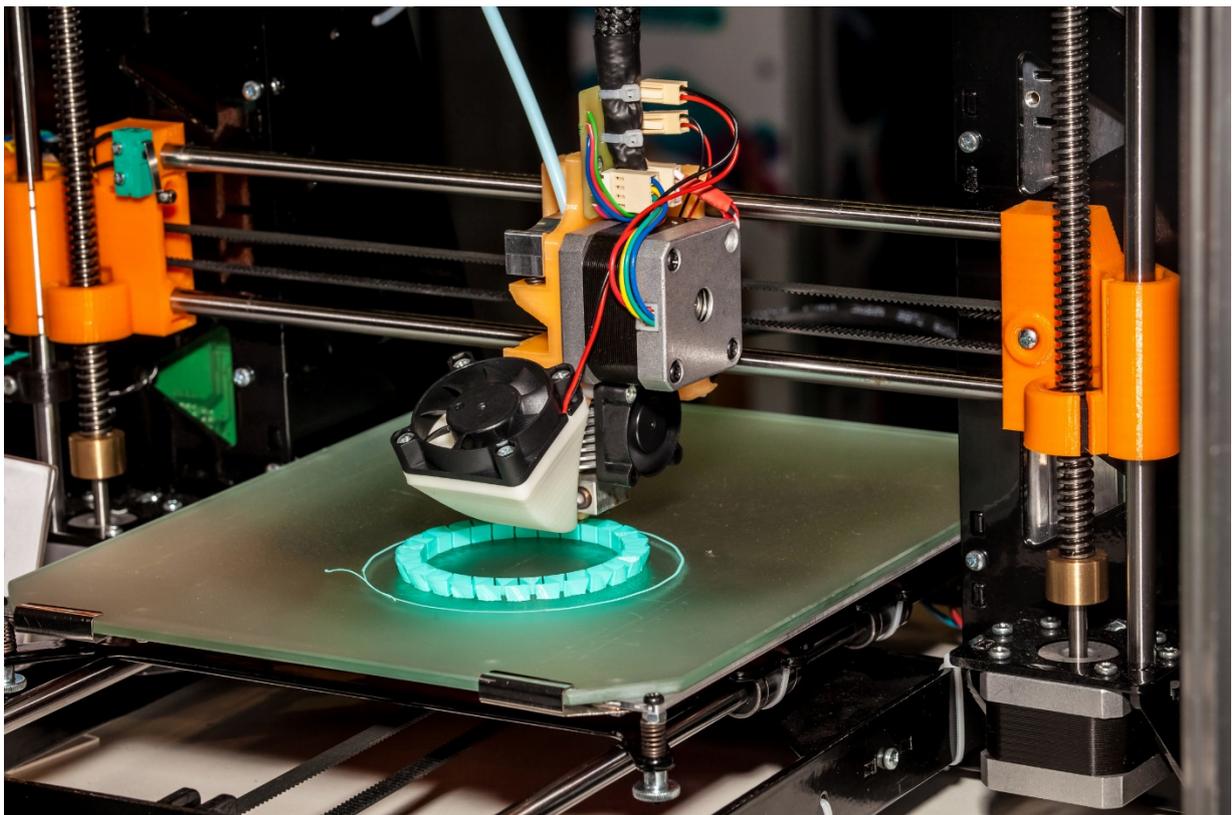
## Qualitativer Vergleich additiver Fertigungsverfahren

---

### Metall- bzw. Polymerverarbeitung

---

Eine grobe Einteilung additiver Fertigungsverfahren erfolgt in metall- beziehungsweise polymerverarbeitende Verfahren. Die Verfahren Laser-Strahlschmelzen (SLM) und Laserauftragsschweißen (LMD) erzeugen Bauteile durch Aufschmelzen von Metallen und stellen somit rein metallverarbeitende Verfahren dar. Die Verfahren SLA, Mikrostereolithographie ( $\mu$ -SLA), Digital Light Processing (DLP), Polyjet, Selektives Lasersintern (SLS) und Jet Fusion verarbeiten ausschließlich Polymere. Das FDM-Verfahren (Bild 1) basiert auf der Aufschmelzung von Polymerdraht. Dieser kann jedoch mit anderen Werkstoffen, wie beispielsweise Metallpulver, angereichert werden. Durch anschließendes Sintern können so indirekt Metallteile gefertigt werden. Dasselbe gilt für das Binder Jetting, bei dem eine Vielzahl verschiedener Materialien mit einem Kleber verbunden werden. Durch anschließendes Sintern können stabile Metall- oder Polymerbauteile hergestellt werden. Das Aerosol Jet-Verfahren ermöglicht das Drucken von Pasten, die verschiedene Metall-, Keramik oder Polymerwerkstoffe beinhalten. Auch bei diesem Verfahren kann ein anschließender Sinterprozess erfolgen, um bestimmte Bauteileigenschaften herbeizuführen.



*Bild 1: Additives Fertigungsverfahren Fused Deposition Modeling*

## Verfügbare Materialien

---

Die Anzahl der prozesssicher zu verarbeitenden Materialien ist ein wesentliches Entscheidungskriterium bei der Auswahl eines additiven Fertigungsverfahrens. Für das FDM-Verfahren werden viele verschiedene Polymerdrähte angeboten. Hinzu kommen hybride Materialien mit beispielsweise Metallen oder Kohlefasern. Das Aerosol Jet Verfahren bietet ebenfalls eine breite Materialpalette. Dabei handelt es sich um Pasten, die verschiedene Werkstoffe beinhalten. Beim Binder Jetting werden die Werkstoffe verklebt. Hierfür können viele verschiedene Materialien unter der Voraussetzung, dass der Kleber ausreichend an ihnen haftet, verwendet werden. Die Verfahren SLA,  $\mu$ -SLA, DLP und Polyjet beschränken sich auf Photopolymere. Für die Verfahren Jet Fusion und SLS stehen nur wenige Polymerpulver zur Verfügung. SLM und LMD beschränken sich auf wenige Metallwerkstoffe.

## Maschinen- und Materialkosten

---

Die Anschaffungskosten für FDM-, SLA- und DLP-Drucker reichen von wenigen hundert Euro für Desktopgeräte bis einigen hunderttausend Euro für Industriegeräte. Die Kosten des FDM-Verfahrens sind stark materialabhängig. Günstiges PLA ist für weniger als 20 Euro pro Kilogramm erhältlich, während der Hochleistungswerkstoff PEEK ca. 1.000 Euro pro Kilogramm kostet. Die Kosten der eingeschränkten Materialpalette der auf dem Effekt der Photopolymerisation basierenden Verfahren liegt zwischen 100 und 450 Euro pro Kilogramm. Die Anschaffungskosten der Polyjetgeräte liegen zwischen ca. 20.000 Euro für Desktopgeräte und ca. 600.000 Euro für Industriegeräte, während  $\mu$ -SLA-Geräte bisher nicht käuflich zu erwerben sind. Multi Jet Fusion Geräte kosten zwischen ca. 50.000 und mehreren hunderttausend Euro. Industrieanlagen für das Binder Jetting kosten zwischen 50.000 und mehr als 1.000.000 Euro. Günstige SLS-Anlagen können für etwa 10.000 Euro angeschafft werden, während Industrieanlagen einige hunderttausend Euro kosten. Der für das SLS-Verfahren häufig verwendete Pulverwerkstoff PA12 kostet ca. 120 Euro pro Kilogramm. Die Preise für Aerosol Jet Anlagen starten bei ca. 200.000 Euro, die für SLM-Anlagen bei 250.000 Euro. Für die metallverarbeitenden Verfahren SLM und LMD werden teure Metallpulver benötigt, die beispielsweise um den Faktor 100 teurer sind als gleichwertige Metalldrähte.

## Genauigkeit von Details und Multimaterialdruck

---

Ein wichtiges Merkmal von additiven Fertigungsanlagen ist die Genauigkeit, mit der Details abgebildet werden können. Eine besonders hohe Genauigkeit kann mit den Verfahren  $\mu$ -SLA, Polyjet und Aerosol Jet erreicht werden. Die Genauigkeiten des FDM und des LMD-Verfahrens sind dagegen verhältnismäßig gering.

Für den Multimaterialdruck eignet sich das Polyjet-Verfahren besonders gut. Beim FDM- und beim Aerosol Jet-Verfahren kann beispielsweise durch die Verwendung mehrerer Extruder beziehungsweise Dispenser ein Multimaterialdruck umgesetzt werden.

## Prozessgeschwindigkeit

---

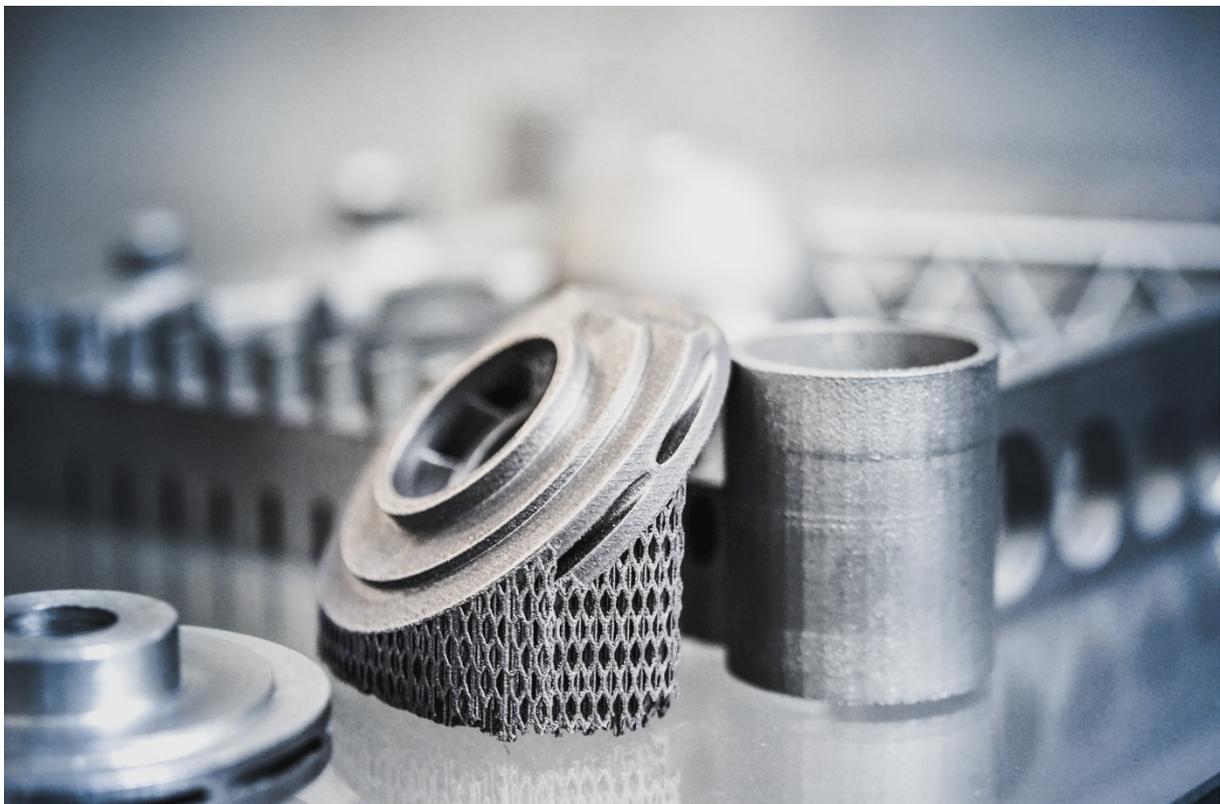
Grundsätzlich sind die Prozesszeiten von additiven Fertigungsanlagen im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren relativ lang. Einige Verfahren, wie das DLP gegenüber dem SLA und das Jet Fusion gegenüber dem SLS, erreichen höhere Prozessgeschwindigkeiten, indem Flächen beleuchtet werden, anstatt die Kontur der Bauteile abzufahren. Das Binder Jetting weist durch die Verwendung eines Klebers eine hohe Prozessgeschwindigkeit auf. Um mechanisch belastbare Bauteile zu erhalten, ist aber ein zeitaufwendiger Sintervorgang nötig.

## Nacharbeitsaufwand und Stützstrukturen

---

Bei den pulverbettbasierten Verfahren werden aufgrund der Abstützung durch das Pulver keine Stützstrukturen benötigt. Eine Ausnahme bildet das SLM-Verfahren, bei dem aufgrund des hohen Wärmeeintrags Stützstrukturen benötigt werden. Allgemein entsteht bei den pulverbettbasierten Verfahren ein hoher Aufwand für das Pulverhandling. Die Verfahren FDM- und Polyjet setzen auf auswaschbare Stützstrukturen. Bei den restlichen Verfahren erfolgt eine mechanische Entfernung der Stützstrukturen (Bild 2). Der Aufwand für die Entfernung ist dann abhängig vom verwendeten Werkstoff.

Bei allen Verfahren kann eine Nacharbeit erforderlich sein, um Anforderungen an die Genauigkeit von Oberflächen oder Geometrien zu erreichen. Diese kann mechanisch, zum Beispiel durch Schleifen, thermisch oder chemisch erfolgen.



*Bild 2: Bauteil vor der Nachbearbeitung*

### Sicherheitsanforderungen

Im Umgang mit den additiven Fertigungsverfahren gibt es einige Sicherheitsrisiken: Beispielsweise werden eine Absaugung und Mundschutz im Umgang mit lungengängigen Pulverwerkstoffen benötigt. Die Dämpfe beziehungsweise darin enthaltene Kleinstpartikel, die beim Aufschmelzen der Polymerwerkstoffe im FDM-Verfahren entstehen, können ebenfalls gesundheitsschädlich sein, weshalb die Räumlichkeiten ausreichend belüftet sein sollten. Die Photopolymere können häufig allergische Hautreaktionen und Augenreizungen hervorrufen.

Additives Fertigungsverfahren	Bewertungskriterium										
	Metallverarbeitung	Polymerverarbeitung	Verfügbare Materialien	Materialkosten	Maschinenkosten	Genauigkeit von Details	Multimaterialdruck	Prozessgeschwindigkeit	Nacharbeitsaufwand	Stützstrukturen	Sicherheitsanforderungen
FDM	+	++	+	+	++	o	+	o	+	+	+
SLS	--	++	-	+	o	+	-	-	-	++	-
SLM	++	--	-	-	-	+	-	-	-	-	-
LMD	++	--	-	o	-	o	o	o	o	o	-
SLA	-	++	o	o	++	+	-	-	-	o	-
µ-SLA	--	++	o	o	--	++	-	-	-	-	-
DLP	--	++	o	o	+	+	-	+	-	o	-
Aerosol Jet	+	+	+	+	-	++	+	o	o	/	o
Polyjet	--	++	o	o	o	++	++	o	+	+	+
Binder Jetting	+	+	o	o	-	o	-	+	-	++	-
Jet Fusion	-	++	-	--	o	+	-	+	-	++	-

Legende:  
 ++ sehr gut geeignet  
 + gut geeignet  
 o befriedigend geeignet  
 - ausreichend geeignet  
 -- ungeeignet

Bild 3: Zusammenfassung der Eigenschaften unterschiedlicher additiver Fertigungsverfahren

## Wirtschaftlichkeit additiver Fertigungsverfahren

---

### FDM- und SLA-Verfahren

---

Die Anschaffungskosten des FDM- und SLA-Verfahrens schwanken zwischen einigen hundert Euro für einfache Desktopgeräte und einigen hunderttausend Euro für industrielle Produktionssysteme. Einer der wesentlichen Preistreiber ist der maximale Bauraum der Anlagen. Unter der Voraussetzung, dass der Bauraum der Desktopgeräte für das größte zu produzierende Bauteil ausreicht, sollte die Anschaffung eines oder mehrerer Desktopgeräte anstatt einer Industrieanlage in Betracht gezogen werden, wie folgendes Beispiel verdeutlicht.

Eine FDM-Industrieanlage mit einem Bauraum von 63,84 Liter kostet in der Anschaffung etwa 30.000 Euro, ein Desktopgerät mit einem Bauraum von 9,25 Liter etwa 3.000 Euro. Der größere Bauraum ermöglicht die Fertigung einer größeren Anzahl an Bauteilen in einem Druckvorgang. Der daraus gewonnene Zeitvorteil ist beim FDM-Verfahren gering, da die Zeiten der pro Druckvorgang erforderlichen Aufheiz- und Abkühlvorgänge sowie der Bauteilentnahme in der Regel kurz sind. Für die gleichen Anschaffungskosten könnten zehn Desktopgeräte, die gemeinsam eine sogenannte Druckerfarm bilden, gekauft und somit eine deutliche Produktivitätssteigerung erreicht werden. Die Verwendung mehrerer Geräte erhöht zudem die Flexibilität im Hinblick auf nachträglich eingehende Druckaufträge. Außerdem steigt mit größerem Bauraum die Wahrscheinlichkeit, dass es zu Schwankungen der Bauraumbedingungen kommt. Ein Fehler während des Drucks könnte zu einer Beschädigung aller Bauteile eines Drucks führen.

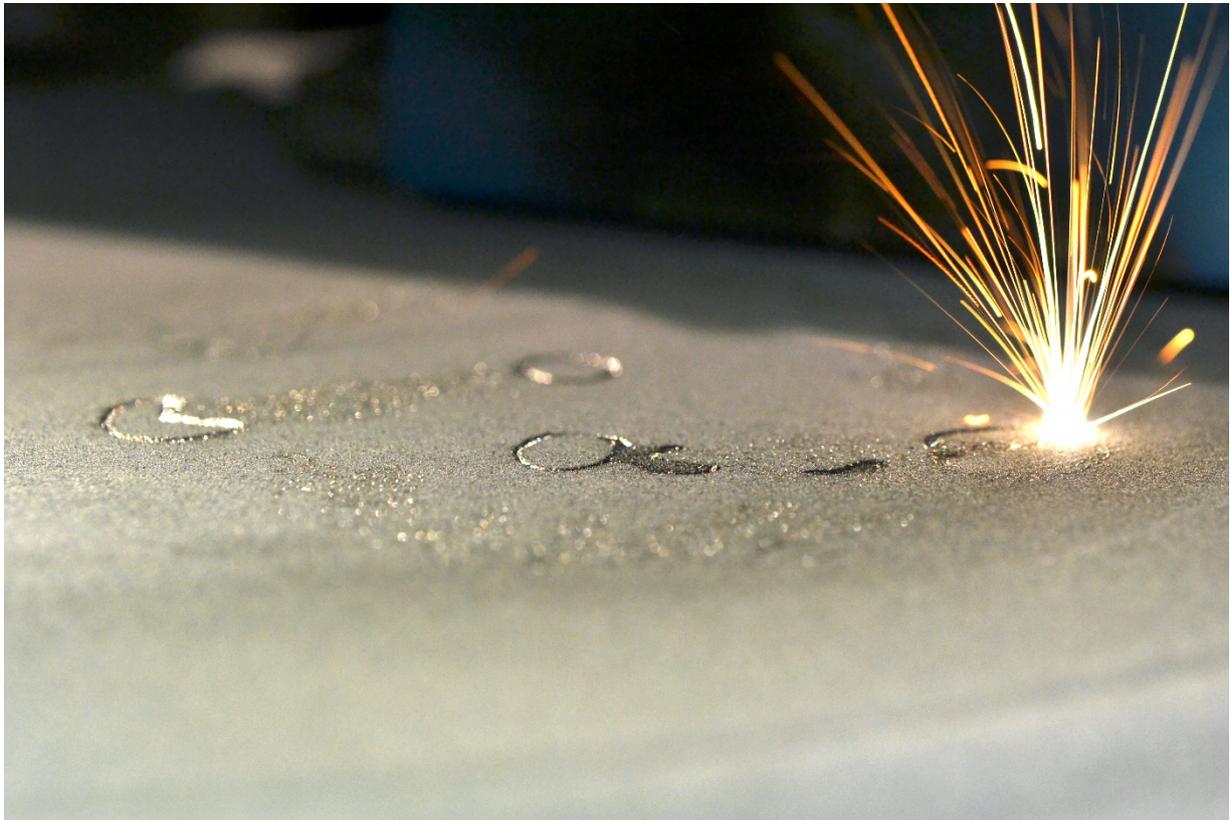
Die Qualität der Komponenten ist bei Industrieanlagen in der Regel höher als bei Desktopgeräten. Zudem verfügen Anbieter von Industrieanlagen häufig über einen besseren Service und bieten beispielsweise Druckprofile für qualifizierte Materialien an. Somit kann eine höhere (Wiederhol-)Genauigkeit sowie Zuverlässigkeit der Industrieanlagen erwartet werden. Die Entscheidung für eine Industrieanlage kann daher, trotz ausreichendem Bauraum der Desktopgeräte und unter Berücksichtigung des Verwendungszwecks der zu produzierenden Bauteile (Prototypen, funktionale Bauteile, sicherheitsrelevante Bauteile), die wirtschaftlichere sein.

### Pulverbettbasierte Verfahren

---

Für pulverbettbasierte Verfahren (Bild 4) gelten andere Maßstäbe für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit als für das FDM- beziehungsweise SLA-Verfahren. Bei diesen Verfahren sollte der Bauraum möglichst vollständig mit Bauteilen gepackt sein, sodass die langsamen Aufheiz- und Abkühlvorgänge weniger stark ins Gewicht fallen. Außerdem ist zwingend der gesamte Bauraum der Anlage mit Pulver gefüllt. Vom verwendeten Pulver kann jedoch nicht alles recycelt werden. Die Anschaffungskosten amortisieren sich in der Regel nur bei einer hohen Auslastung der Maschinen und des Maschinenbauraums. Andernfalls ist ein Fremdbezug in Betracht zu ziehen (s. 3D-gedruckte Bauteile: Eigenfertigung oder Fremdbezug). Für das SLS-Verfahren existieren Desktop-Lösungen, die für wenige zehntausend Euro erhältlich sind. Das SLM-Verfahren hingegen ist ausschließlich mit hochpreisigen Geräten im Markt vertreten. Allgemein ist die Bezeichnung Desktopgeräte im

Zusammenhang mit pulverbettbasierten Verfahren kritisch zu betrachten, da der Umgang mit den feinen, lungengängigen Pulvern gesundheitliche Risiken birgt.



*Bild 4: Additives Fertigungsverfahren Laser-Strahlschmelzen*

#### Eigenfertigung oder Fremdbezug

Eine elementare Fragestellung ist dabei, ob eine additive Eigenfertigung stattfindet oder die Bauteile fremdbezogen werden. Abhängig vom Einzelfall ist es erforderlich, die Situation zu analysieren und eine fundierte Entscheidung zu treffen. Ausgewählte Fragestellungen, die Anhaltspunkte für eine Entscheidung sein können, werden daher nachfolgend aufgeführt und sollen als Entscheidungshilfe dienen. Zwischen der Eigenfertigung und dem Fremdbezug als spontaner Einkauf am Markt sind eine Reihe von Mischformen der Beziehung zwischen Kunde und Lieferant möglich. Dies sind zum Beispiel Jahresverträge, Entwicklungskooperationen, Joint Ventures, Franchise-Verträge oder Betreibermodelle.

#### Welche Bauteile sollen hergestellt werden?

Für additiv gefertigte Bauteile sind nach DIN EN ISO 17296-3 unterschiedliche Anforderungen an die Eigenschaften zu definieren. Dies sind Anforderungen an die Oberfläche (z. B. Farbe, Oberflächenstruktur), geometrische Anforderungen (z. B. Größe, Länge), mechanische Anforderungen (z. B. Härte, Zugfestigkeit) und Anforderungen an die Aufbauwerkstoffe (z. B. Dichte, chemische Eigenschaften). Abhängig davon, welchen Zweck das Bauteil hat,

unterscheidet man grob in die Anforderungsgruppen Prototypen, funktionale Bauteile sowie hochentwickelte, sicherheitsrelevante Bauteile. Wenn 3D-Druckmodelle als Prototyp in einem frühen Stadium des Designprozesses genutzt werden, um das Aussehen zu überprüfen, könnte der Kauf eines Desktopdrucker eine gute Lösung sein. Es sind ausschließlich geometrische Anforderungen mit relativ großen Toleranzen relevant. Sollen hingegen komplexe Sonderbauteile mit sehr großen Abmessungen oder einem sicherheitskritischen Einsatzzweck hergestellt werden, ist es gegebenenfalls sinnvoll, Dienstleister einzubinden. Diese verfügen über großes Fachwissen und einen Maschinenpark, um spezielle Anforderungen und minimale Toleranzen bei der Fertigung zu berücksichtigen.

#### Wie viele Bauteile sollen hergestellt werden?

---

Die Menge der additiv zu fertigenden Bauteile hat einen wesentlichen Einfluss auf die Entscheidung, ob eine Eigenfertigung oder ein Fremdbezug sinnvoll ist. Grundsätzlich ist es erst ab einer bestimmten Stückzahl wirtschaftlich, eigene additive Anlagen zu betreiben. Werden additiv gefertigte Bauteile selten benötigt, sollte nach Möglichkeit auf einen Dienstleister zurückgegriffen werden, da die Auslastung der Anlagen in diesem Fall nicht sichergestellt werden kann. Des Weiteren kann durch die Einbindung von Druckdienstleistern flexibel auf Bedarfsschwankungen reagiert werden, da Auftragsvolumina relativ problemlos angepasst werden können.

#### Was ist die Kernaufgabe des Unternehmens?

---

Eine zu hohe Leistungstiefe bindet unnötig personelle Kapazitäten und Kapital. Für die eigentlichen Kernaufgaben des Unternehmens stehen diese Ressourcen dann nicht mehr zur Verfügung. Jedoch ist aufgrund des dynamischen Marktumfeldes eine hohe Sensibilität gegenüber neuen Technologien wie dem 3D-Druck und deren Einfluss auf das bestehende Geschäftsmodell gefragt. Es besteht die Gefahr, dass das zukunftssträchtige, innovative Themengebiet 3D-Druck durch einen Fremdbezug anderen Unternehmen überlassen wird, da kein Aufbau von Know-how im eigenen Unternehmen stattfindet. Des Weiteren sollte der Grad der Abhängigkeit von einem Lieferanten in den Entscheidungsprozess einbezogen werden. Die Produktions- und Lieferbereitschaft muss auch bei einem Ausfall des Lieferanten gegeben sein.

#### Wie hoch ist das Budget und in welchem Zeitraum soll 3D-Druck eingeführt werden?

---

Die Anschaffung einer additiven Anlage kann abhängig vom einzusetzenden Verfahren erhebliche Investitionen erfordern. Die Kosten schwanken dabei abhängig vom Einsatzzweck und dem Druckverfahren zwischen einigen hundert Euro für einfache Desktopgeräte bis über eine Million Euro für professionelle Anlagen. Neben den reinen Anlagenkosten entstehen weitere Kosten für die Schulung des Personals, die Einrichtung der erforderlichen Softwarelösungen und die Wartung der Anlagen. Die Investition in eine additive Fertigungsanlage kann daher ein erhebliches Klumpenrisiko darstellen, das mit einem entsprechenden Geschäftsmodell gerechtfertigt werden sollte. Des Weiteren dauert die

Umsetzung der aufgezeigten Investitionsmaßnahmen häufig lange, da neben der reinen Beschaffung auch die entsprechenden Kompetenzen zum Umgang mit den Anlagen aufgebaut werden müssen. Wenn Bauteile zeitnah benötigt werden und noch keine additiven Anlagen im Unternehmen vorhanden sind, sollte der Fremdbezug daher der Herstellung von Bauteilen im eigenen Unternehmen vorgezogen werden.

### In welcher Umgebung sollen die 3D-Drucker eingesetzt werden?

Ob 3D-Drucker im eigenen Unternehmen eingesetzt werden können, ist stark von den Umgebungsbedingungen abhängig. Soll ein 3D-Drucker zum Beispiel in einer Büroumgebung aufgebaut werden, sind auf der Extrusion von Kunststoffmaterialien basierende Desktopgeräte prinzipiell geeignet. Jedoch kommt es auch hierbei zu Emissionen von Kleinstpartikeln, welche der Mensch einatmet. Daher sollten gut belüftete Räume als Aufstellort gewählt werden und Personen sollten sich grundsätzlich nicht dauerhaft in der Nähe eines 3D-Druckers aufhalten. Für die weiteren Druckverfahren sind zum Teil erhöhte Anforderungen an die Umgebungsbedingungen zu stellen, da zum Beispiel im Bereich der pulverbasierten additiven Fertigungsverfahren eine spezielle Handhabung von Pulvermaterialien erforderlich und zusätzlicher Platz für Pulversammel- und Recyclinganlagen zu berücksichtigen ist. Auch sind die Materialien zum Teil gesundheitsgefährdend. So werden bei der Stereolithografie Harze verarbeitet, die Augenreizungen oder allergische Hautreaktionen hervorrufen können. Es ist daher einzelfallspezifisch abzuwägen, ob die entsprechend ausgestatteten Räumlichkeiten im eigenen Unternehmen bereitgestellt werden können.

### Kontaktdaten

IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH  
Hollerithallee 6 | 30419 Hannover

☎ +49 (0)511 27976-0 | @ info@iph-hannover.de | 🌐 www.iph-hannover.de