

Additive Fertigungsverfahren

**Michael F. Zäh, Johannes Schilp, Johannes Weirather, Christian Zeller,
Benedikt Schmiegel, Michael Ott, Sebastian Westhäuser**

Angaben zur Veröffentlichung / Publication details:

Zäh, Michael F., Johannes Schilp, Johannes Weirather, Christian Zeller, Benedikt Schmiegel, Michael Ott, and Sebastian Westhäuser. 2018. "Additive Fertigungsverfahren." In *Handbuch Konstruktion*, edited by Frank Rieg, 995–1013. München: Hanser.
<https://doi.org/10.3139/9783446456198.036>.

Nutzungsbedingungen / Terms of use:

licgercopyright



5.1	Einführung	997	5.6	Richtlinien für die Konstruktion additiver Bauteile	1007
5.2	Definition	998	5.6.1	Funktionsintegration	1007
			5.6.2	Bauteilgröße und Bauteilpositionierung	1010
5.3	Verfahrenskette	1000	5.6.3	Verarbeitbare Werkstoffe	1010
5.3.1	Pre-Prozess	1000	5.6.4	Mechanische Kennwerte	1011
5.3.2	In-Prozess	1001	5.6.5	Oberflächengüte und Aufmaß	1011
5.3.3	Post-Prozess und nachgelagerte Prozesse	1001	5.6.6	Treppenstufeneffekt (Stair Casing)	1011
			5.6.7	Supports und Maßhaltigkeit	1012
5.4	Einteilung der additiven Fertigungsverfahren	1002	5.7	Potenziale	1012
5.5	Vorstellung wichtiger Schichtbauverfahren	1002	5.8	Zusammenfassung und Ausblick	1012
5.5.1	Laserstrahlschmelzen	1002	5.9	Weiterführende Informationen	1013
5.5.2	Elektronenstrahlschmelzen	1005			
5.5.3	Laser-Sintern	1006			
5.5.4	Laserauftragschweißen	1006			
5.5.5	3D-Drucken	1007			

Michael F. Zäh, Johannes Schilp, Johannes Weirather, Christian Zeller, Benedikt Schmiegel, Michael Ott, Sebastian Westhäuser



Additive Fertigungsverfahren beruhen auf dem Grundgedanken des schicht- oder elementweisen Aufbaus. Die Fertigung der Geometrien erfolgt aus formlosen Materialien (Flüssigkeiten, Pulver) oder formneutralen Materialien (Band, Draht, Papier, Folie) mittels chemischer und/oder physikalischer Prozesse über eine CAD/CAM-Kopplung direkt aus den digital erzeugten CAD-Datenmodellen (vgl. VDI 3405).

5.1 Einführung

Nachdem die additiven Fertigungsverfahren erstmals 1987 in den USA der Öffentlichkeit vorgestellt wurden, konnten die ersten Maschinen in den Jahren 1989 und 1990 nach Europa und Deutschland ausgeliefert werden. Damals handelte es sich vor allem um Stereolithographie(SL)-Maschinen. Im Laufe der folgenden Jahre entstanden weitere Prozessvarianten, u.a. das Laserstrahlschmelzen bzw. Laser Beam Melting (LBM) und das Layer Laminated Manufacturing (LLM). Auf Basis der bekannten Prozesse werden in den nächsten Jahren noch neue bzw. modifizierte Verfahren (weiter)entwickelt, da das Potential der additiven Fertigung z.B. in der Multimaterialverarbeitung noch nicht ausgeschöpft ist.

Der Prozessablauf lässt sich wie folgt zusammenfassen (vgl. Kapitel IV.5.3): Während des schicht- oder elementweisen Aufbaus von Bauteilen wird ein formloses oder neutrales Ausgangsmaterial aufgetragen und anschließend verfestigt bzw. mit bereits gefertigten Volumenbereichen verbunden. Alle additiven Fertigungsverfahren haben bzgl. der Datenverarbeitung (CAD/CAM-Kopplung) drei Gemeinsamkeiten:

- Für die additive Fertigung eines Bauteils ist ein 3D-CAD-Modell notwendig, in dem die geometrischen Daten des Werkstücks digital hinterlegt sind.
- Für den Bauprozess müssen die 3D-Körper mittels des sogenannten Slice-Prozesses digital in die einzelnen Schichten zerlegt und damit auf zwei Dimensionen

reduziert werden. Die Schichtdaten geben ein verfahrensspezifisches CNC-Programm vor.

- Der anschließende Fertigungsprozess erfolgt auf einer numerisch gesteuerten Maschine, die die erstellten Informationen schichtweise abarbeitet und so ein Bauteil generiert.
- Das gefertigte Bauteil muss in den meisten Fällen nachbearbeitet werden. Hier können alle Fertigungsfahren nach DIN 8580 wie z.B. das Trennen angewandt werden.
- Die additive Fertigung ist in den meisten Fällen ein Teil einer Prozesskette, die auch konventionelle Fertigungsverfahren enthalten kann. Da diese derzeit noch vieler manueller Handhabungsschritte bedarf (wie z.B. die Reparatur der Fertigungsdaten oder das Entpacken nach dem additiven Fertigungsprozess) bestehen Bestrebungen den Automatisierungsgrad innerhalb der Prozesskette weiter zu steigern.

Ein Vergleich mit konventionellen Fertigungsverfahren zeigt das wirtschaftliche und technische Potential der additiven Fertigung: Während einfache Volumenkörper in großen Stückzahlen mittels bekannter Verfahren wie Drehen, Fräsen oder Gießen wirtschaftlich produziert werden können, steigt mit sinkender Stückzahl und mit zunehmender Bauteilkomplexität bzw. bei filigranen Strukturen die wirtschaftliche Anwendbarkeit von Schichtbauverfahren. Zudem können einzelne, hochkomplexe Bauteile, z.B. mit funktionalen, innen liegenden Geometriemeerkmalen, ausschließlich mit additiven Fertigungsverfahren herge-

stellt werden. Darüber hinaus rückt das Zusammenspiel konventioneller und additiver Fertigungsverfahren immer weiter in den Fokus, was auch als „hybride Fertigung“ bezeichnet wird. Hierunter kann zum einen verstanden werden, dass ein konventionell gefertigtes Teil (z.B. ein Schmiedeteil) als Grundkörper dient, auf dem weitere Bauteilbereiche mittels additiver Fertigungstechnologien erzeugt werden. Zum anderen wird die Kombination spannender („subtraktiver“) Bearbeitung und additiver Fertigung innerhalb eines Anlagenkonzepts ebenfalls teilweise als hybride Fertigung bezeichnet.

Die additiv (oder hybrid) erzeugten Werkstücke können dabei sehr unterschiedliche Aufgaben in verschiedenen Einsatzgebieten erfüllen:

■ Modelle:

- **Konzeptmodelle** dienen zur frühestmöglichen Visualisierung der Abmessungen und des allgemeinen Erscheinungsbildes eines Produkts.
- **Designmodelle** dienen zur form- und maßgenauen Darstellung des CAD-Modells. Die Oberflächenqualität und die Lage einzelner Elemente ist von Bedeutung.

■ Prototypen:

- **Funktionsprototypen**, welche dem Serienmuster weitgehend entsprechen, dienen zur Überprüfung einer oder mehrerer vorgesehener Funktionen des späteren Serienteils.
- **Technische Muster**, welche sich vom späteren Serienbauteil nur durch das Fertigungsverfahren unterscheiden, dienen zur Überprüfung der gestellten Anforderungen.

■ Bauteile:

- Mittels der additiven Fertigung können zunächst (**Form-)Werkzeuge** und damit in einem nachfolgenden Prozess (z.B. dem Spritzgießen) Endprodukte hergestellt werden.
- Kundenindividuelle, endkonturnahe und vollständig

funktionale **Einzel- und Serienbauteile** können direkt durch additive Verfahren hergestellt werden.

Wie diese Übersicht der Anwendungsgebiete zeigt, können additive Fertigungsverfahren in allen Phasen des Produktentstehungsprozesses eingesetzt werden.

5.2 Definition

Alle Verfahren, mit deren Hilfe dreidimensionale Modelle, Prototypen und Bauteile additiv, also durch Verbindung mehrerer Volumenelemente, hergestellt werden, können als additive Fertigungsverfahren bezeichnet werden. In der Literatur und in der Praxis werden häufig weitere Bezeichnungen verwendet, die in der VDI-Richtlinie 3405 zusammengefasst und standardisiert sind.

Die additive Fertigung wurde in der Vergangenheit häufig mit dem Präfix „Rapid“ versehen, um auszudrücken, dass diese schneller als ihre konventionellen Alternativen sind. Die Zeitsparnis ergibt sich aus der Tatsache, dass unter Einsatz der additiven Technologien zwischen der Erstellung des digitalen Modells und der Fertigstellung des Bauteils weniger Prozessschritte als bei den konventionellen Verfahren erforderlich sind. So entfällt beispielsweise der Werkzeug- und Formenbau und die Steuerdaten des Fertigungssystems werden weitgehend automatisiert erstellt. Heute wird der Begriff „Rapid“ nur noch selten im Kontext des Rapid Toolings oder des Rapid Prototyping verwandt.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass die additiven Verfahren neben einer kürzeren Zeitspanne zwischen Design und Beginn der Fertigung in bestimmten Fällen auch hohe wirtschaftliche Einsparpotentiale bieten.

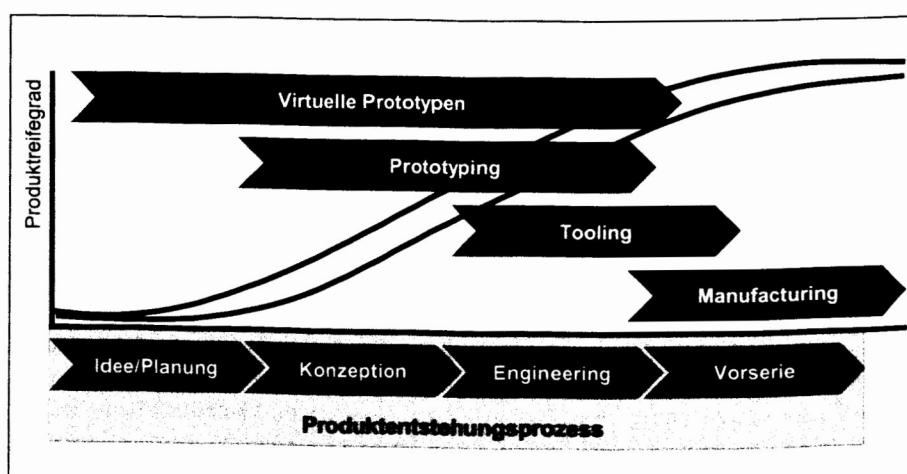


Abb. 5.1 Additive Fertigungs-technologien im Produktentstehungsprozess

Wie vorangehend erwähnt, können die additiven Verfahren über den gesamten Produktentstehungsprozess wirtschaftlich zum Einsatz kommen (Abb. 5.1). Additive Technologien werden dabei in die Bereiche Prototyping, Tooling und Manufacturing eingeteilt.

Mit **Prototyping** wird ein Anwendungsbereich der Additiven Fertigungstechnologien bezeichnet, in dem auf kostengünstige und schnelle Weise Versuchsteile und Prototypen hergestellt werden. Diese Bauteile weisen meist eingeschränkte oder spezielle Funktionalitäten auf. Die Konstruktion kann, muss aber nicht fertigungsgerecht im Hinblick auf die Serienfertigung sein. Ebenso kann im Prototyping-Bereich auf den Einsatz des meist teuren Serienmaterials verzichtet werden. Der Begriff **Prototyping** deckt damit nur einen kleinen Teil der additiven Anwendungen ab und sollte daher nicht gleichbedeutend mit dem Begriff additive Verfahren verwendet werden.

Unter **Tooling** wird der Einsatz von additiven Verfahren, Werkzeugen und Formen zur Herstellung von Prototypen, Vorserien- und Serienbauteilen verstanden (z.B. Gieß-, Spritz- und Ziehformen). Dabei wird größtenteils das Laserstrahlschmelzen eingesetzt, durch welches neben der schnellen Herstellung auch die Formgebungsfreiheiten der additiven Fertigungstechnologien effektiv genutzt werden können. Um die nötige Präzision bzw. die geforderten Oberflächeneigenschaften zu erreichen, werden die additiv hergestellten Werkzeuge und Formen häufig noch mit klassischen Verfahren wie dem HSC-Fräsen nachbearbeitet. In diesem Fall wird von *direktem* Tooling gesprochen. Als *indirektes* Tooling wird die Herstellung von Werkzeugen durch Abformen von additiv hergestellten Urmustern bezeichnet.

Mit **Manufacturing** wird die additive Herstellung von Endprodukten für die Einzel- oder Serienfertigung bezeichnet. Die Bauteile werden aus den Konstruktionsdaten im Originalwerkstoff gefertigt und besitzen alle Merkmale des Endprodukts. Neben der Möglichkeit zur schnellen Bauteilherstellung werden durch den additiven Aufbau produktseitig konstruktive Gestaltungsmerkmale (z.B. oberflächennahe Kühlkanäle oder gekrümmte Bohrungen) ermöglicht, welche mit konventionellen Produktionsmethoden nur bedingt oder nicht herstellbar sind. Mittels additiver Verfahren gelingt es somit, die Möglichkeiten zur Fertigung von neuen Gestaltungselementen zu erweitern bzw. zu beherrschen und ohne Umwege in die Fertigung von Endprodukten für die Einzel- oder Serienfertigung einzusteigen. Neben der Verkürzung der Produktentwicklung und der Produktentstehung durch den Einsatz der Technologien im Prototypen- und Werkzeugbau bzw. zur direkten Herstellung von Endbauteilen erleichtert der Einsatz der additiven Fertigungsverfahren auch die logische Verkettung der Auftragsdatenverarbeitung. Nicht nur die Herstellungszeit selbst kann im Ver-

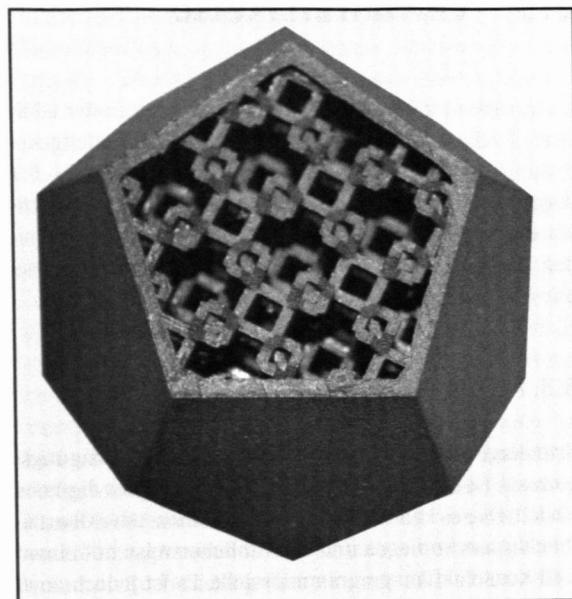


Abb. 5.2 Mittels Strahlschmelzen hergestellter Dodekaeder mit innen liegender geometrisch komplexer Struktur aus Metall, ohne mechanische Nacharbeit

gleich zu konventionellen Verfahren als schnell bezeichnet werden, durch die direkte CAD/CAM-Kopplung wird auch die Arbeitsvorbereitung z.B. für die Erzeugung und Konvertierung von Fertigungsdaten vereinfacht und beschleunigt.

Zu den zukunftssicheren Technologien zählen im Metallbereich vor allem das Strahlschmelzen, das Electron Beam Melting (EBM) oder das Laserstrahlschmelzen (LBM, vgl. Abb. 5.2) sowie das Laserauftragschweißen. Diese eignen sich sowohl zur Erstellung von Prototypen und Bauteilen als auch zum Reparieren oder Ändern von Werkzeugen und Gießformen. Verfahren wie das Laserauftragschweißen ermöglichen die Bearbeitung räumlicher Flächen durch schichtweises Aufschmelzen von Metallpulver im Laserstrahl. Dabei ist der Wärmeeintrag ins Werkstück vergleichsweise gering. Beide oben genannten Verfahrensvarianten sind gekennzeichnet durch

- das Metallpulver als Ausgangswerkstoff,
- vollständiges Schmelzen des Metallpulvers durch den Laser,
- Mischen und Auftragen von verschiedenen Metallpulvern auf andersartige Grundmaterialien,
- vollautomatische Fertigung,
- Teilegenerierung direkt aus den 3D-CAD-Daten,
- endkonturnahe Fertigung mit geringer Nacharbeit an den Funktionsflächen.

5.3 Verfahrenskette

Übergreifend über alle Verfahrensprinzipien in der additiven Fertigung gilt ein ähnliches Prinzip der Modellgenerierung und der Prozesskette, welches der in Abb. 5.3 dargestellte Verfahrensablauf zeigt. Der Ablauf zur additiven Erzeugung von Bauteilen kann dabei in die im Folgenden beschriebenen Kategorien Pre-Prozess, In-Prozess und Post-Prozess eingeteilt werden (VDI 3405).

5.3.1 Pre-Prozess

Grundlage und Voraussetzung aller additiven Fertigungsprozesse ist ein vollständiges, dreidimensionales digitales Modell. Dieses kann in Form eines Volumen- oder Oberflächenkörpers vorliegen und wird üblicherweise mit einem CAD-Konstruktionsprogramm erstellt. Es ist jedoch auch möglich, die Modelldaten durch 3D-Digitalisierung eines realen Teils zu erhalten.

Ein Nachteil vieler additiver Fertigungsverfahren ist das Auftreten prozessbedingter Verformungen. Werden hohe Anforderungen an die Maßhaltigkeit des Bauteils gestellt, kann durch eine geeignete Vordeformation des digitalen Modells versucht werden, die Abweichung von der Soll-

Geometrie zu reduzieren. Dies setzt jedoch voraus, dass die vom eingesetzten Verfahren sowie der Bauteilgeometrie und der auf die Aufbaurichtung bezogenen Orientierung abhängigen Verformungen bekannt sind. Hierfür ist meist die Fertigung und anschließende Vermessung mindestens eines Probekörpers erforderlich.

Soll eine nachträgliche spanende Bearbeitung der additiv gefertigten Teile erfolgen, so ist an den jeweiligen Flächen eine ausreichende Bearbeitungszugabe (Aufmaß) im digitalen Modell vorzusehen.

Die Geometriedaten werden anschließend in ein für die weitere Verarbeitung geeignetes Format überführt. Hauptsächlich findet hierfür das STL-Format Verwendung, welches auf der Annäherung der Oberfläche durch Dreiecke basiert (Triangulation). Dieses Format wird auch von allen gängigen CAD-Programmen unterstützt.

Die Dreiecke werden durch die Lage der drei Eckpunkte und den zugehörigen Normalenvektor, der vom Inneren des Bauteils nach außen zeigt, definiert. Eine Überprüfung der Geometrie nach der Triangulation sollte dabei aber immer durchgeführt werden. In der Regel stellt jede Software zur Datenvorbereitung Funktionen für die Reparatur von Triangulationsfehlern zur Verfügung. Im Fall gekrümmter Oberflächen führt die Konvertierung in das STL-Format (bedingt durch die Facettierung) unvermeidlich zu Abweichungen von der Soll-Geometrie. Dieser Feh-

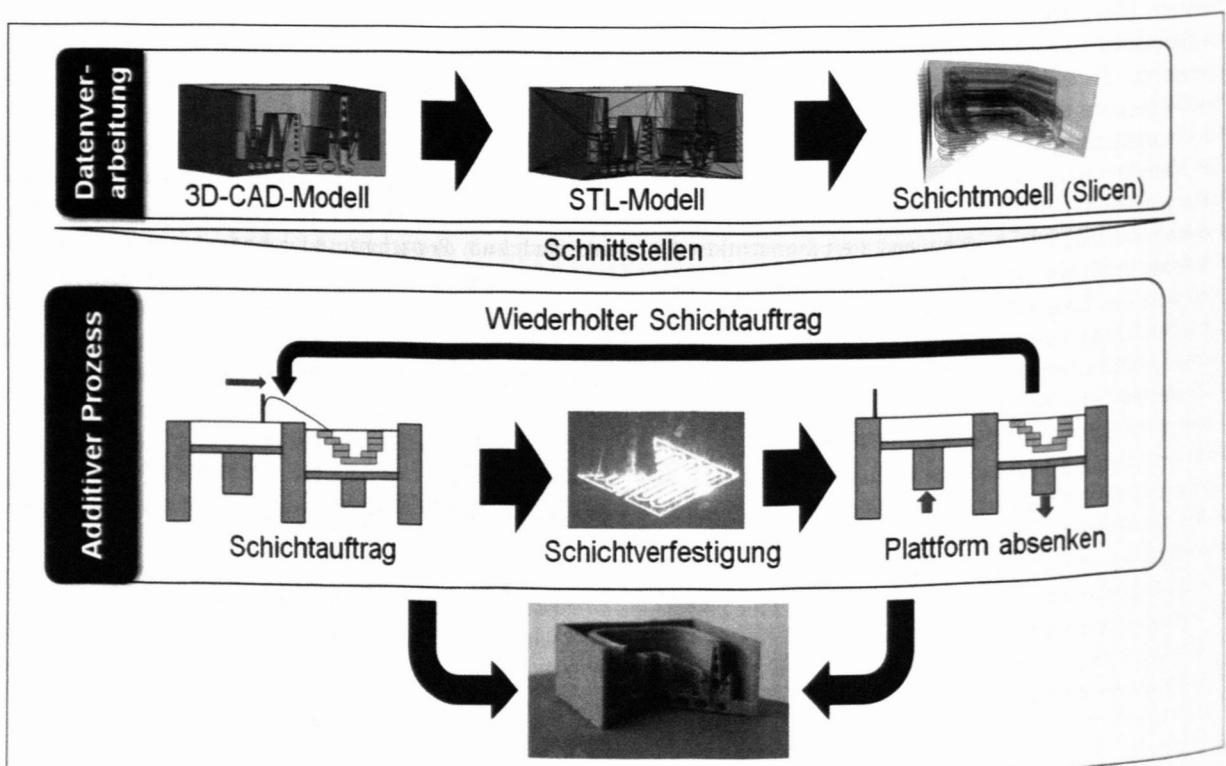


Abb. 5.3 Ablauf der Datenverarbeitung sowie des Bauprozesses vom 3D-Volumenmodell bis zum fertigen Bauteil bei der Anwendung additiver Fertigungsverfahren

Ier kann zwar durch eine Erhöhung der Anzahl an Dreiecken reduziert werden, jedoch wächst damit auch der erforderliche Speicherbedarf.

Neben STL existieren heute auch andere Formate mit erweitertem Funktionsumfang. So bietet beispielsweise der Datentyp AMF (Additive Manufacturing File Format) die Möglichkeit, räumlich zugeordnete Textur- und Stoffinformationen bereitzustellen. Damit eignet sich dieses Format insbesondere für die additive Multimaterialverarbeitung. Auch AMF basiert auf einer facettierten Darstellung der Oberfläche, im Unterschied zu STL können die Dreiecke hier jedoch auch eine Krümmung aufweisen. So kann die Abweichung zur Soll-Geometrie an gekrümmten Flächen verringert werden, ohne dass der Speicherbedarf merklich zunimmt.

Die beispielsweise im STL vorliegende Geometrie wird nun bezogen auf die Aufbaurichtung orientiert. Anschließend findet der Slice-Prozess statt. Dabei wird das dreidimensionale Modell in einen Satz von Schichten zerlegt. Der Abstand zwischen zwei Schichten (Schichtdicke) richtet sich nach dem zur Anwendung kommenden Verfahren bzw. der gewünschten Oberflächengüte. An Rundungen, Freiformflächen und Schrägen entsteht durch den schichtweisen Aufbau eine Abweichung von der Soll-Geometrie. Dies wird als Stufeneffekt bezeichnet und führt zu einer geringeren Oberflächenqualität. Je größer die Schichtdicke ist, desto stärker ist dieser Stufeneffekt ausgeprägt. Gleichzeitig werden mit einer größeren Schichtdicke die Fertigungszeit und somit die Bauteilkosten reduziert. Für jeden Bauprozess gilt es, diesbezüglich einen geeigneten Kompromiss zu finden.

In einem letzten Schritt im Pre-Prozess bzw. der Bauprozessvorbereitung ist das Teil virtuell unter Einsatz der Anlagesoftware im Bauraum der Maschine zu positionieren. Anschließend werden die einzelnen Schichtinformationen in Steuerdaten der Anlage umgewandelt und das Bedienpersonal legt die verfahrensspezifischen Fertigungsparameter fest. Weiterhin ist die Vorbereitung der Anlage und das Bereitstellen des Ausgangsmaterials dem Pre-Prozess zuzuordnen.

5.3.2 In-Prozess

Der Kategorie In-Prozess kann neben der additiven Fertigung selbst auch die darauffolgende Entnahme des Bauteils bzw. der Bauteile aus der Maschine zugeordnet werden (VDI 3405). Den Kernprozess der additiven Fertigung zeichnet bei allen Verfahren ein vergleichsweise hoher Automatisierungsgrad aus. Ein Eingreifen des Anwenders ist in der Regel nicht erforderlich. Prinzipiell setzt sich jedes additive Fertigungsverfahren aus mindestens zwei Teilprozessen zusammen – dem Zuführen des Ausgangs-

materials sowie dessen Anbindung an bereits hergestellte Bauteilbereiche. Je nach Verfahren können diese Teilschritte entweder annähernd simultan oder zeitlich von einander getrennt erfolgen. Die additiven Fertigungstechnologien unterscheiden sich auch hinsichtlich des Ausgangszustands der eingesetzten Werkstoffe. Diese können unter anderem in fester und flüssiger Form sowie als Pulver vorliegen. Weiterhin werden verfahrensabhängig verschiedene Prinzipien zum Schaffen der Verbindung mit bereits gefertigten Strukturen eingesetzt. Als Beispiele können der lokale Energieeintrag durch eine Strahlquelle oder das Zuführen eines chemischen Aktivators genannt werden.

Durch den schicht- oder elementweise erfolgenden Aufbau eröffnet sich ferner die Möglichkeit, die Entstehung des gesamten Bauteils nachzuverfolgen. Unter Einsatz geeigneter Messtechnik und einer automatisierten Datenverarbeitung kann damit das Auftreten von Prozessfehlern erkannt, die Fertigung des gesamten Teils dokumentiert und so ein Beitrag zur Qualitätskontrolle geleistet werden. Nach Abschluss des Bauprozesses werden die Bauteile aus der Maschine entnommen. Dieser Prozessschritt ist – im Gegensatz zur additiven Fertigung selbst – gegenwärtig nur in geringem Maße automatisiert, wird also üblicherweise manuell vom Bedienpersonal durchgeführt.

5.3.3 Post-Prozess und nachgelagerte Prozesse

Unter der Kategorie Post-Prozess können die nach der Entnahme des Bauteils durchzuführenden Tätigkeiten zusammengefasst werden. Diese sind spezifisch für das zuvor eingesetzte additive Fertigungsverfahren und hängen vom Werkstoff sowie auch von der für die Komponente vorgesehenen späteren Anwendung ab.

In der additiven Fertigung typische Nachbearbeitungsschritte sind beispielsweise die Befreiung der Bauteile von Rückständen des Ausgangsmaterials, das Trennen des Werkstücks von der Bodenplatte oder das Entfernen von Stützstrukturen. Außerdem ist die Wiederaufbereitung des Ausgangswerkstoffs für eine erneute spätere Verwendung hier einzurufen.

Nach Abschluss des Post-Prozesses kann das Bauteil entweder unmittelbar in die Anwendung überführt werden oder es sind nachgelagerte Prozessschritte erforderlich, bevor die Komponente die Anforderungen erfüllt. Für eine weitere Bearbeitung kommen grundsätzlich alle konventionellen Fertigungsverfahren in Frage, wie sie in DIN 8580 beschrieben sind.

5.4 Einteilung der additiven Fertigungsverfahren

Additive Fertigungsverfahren lassen sich nach verschiedenen Gesichtspunkten kategorisieren. Im Folgenden wird die Einteilung entsprechend ihrem Verfahrensprinzip nach der DIN EN ISO 17296 vorgestellt.

Photopolymerisation im Bad

Bei dieser Verfahrensgruppe erfolgt die Verfestigung über eine chemische Reaktion. Ein flüssiges Photopolymer wird in einer Wanne üblicherweise durch UV-Strahlen mittels eines Lasers oder mittels Lampen gezielt verfestigt (polymerisiert) und mit den zuvor gefertigten, darunterliegenden Schichten verbunden. Stützstrukturen sind notwendig, um das Absinken von überhängenden Bauteilbereichen in die Flüssigkeit zu vermeiden.

Werkstoffauftrag

Als Ausgangswerkstoff dient ein flüssiges Polymer oder ein geschmolzenes Wachs, welches über eine Dosiereinrichtung in Form von Tropfen gezielt ablegt wird. Der Bindungsmechanismus ist eine chemische Reaktion, die über Lichtstrahlung oder eine thermische Quelle in der Dosiereinrichtung ausgelöst wird. Da keine stützende Wirkung durch nicht verfestigtes Material vorhanden ist, werden Stützkonstruktionen benötigt, wenn überhängende Bereiche zu fertigen sind.

Bindemittelauftrag

Über einen Druckkopf wird schichtweise Binderflüssigkeit in ein zuvor aufgetragenes Pulverbett eingebracht. Der Binder löst eine chemische und/oder thermische Reaktion aus. Ein Abstützen von überhängenden Bauteilbereichen und eine Anbindung an die Bodenplatte sind üblicherweise nicht notwendig, da das Pulverbett selbst die abstützende Funktion übernimmt.

Pulverbettbasiertes Schmelzen

In dieser Gruppe lassen sich alle Verfahren zusammenfassen, bei denen thermische Energie genutzt wird, um selektiv Bereiche in einem Pulverbett zu verfestigen. Als Energiequellen können Laser, Elektronenstrahlquellen und Infrarot-Lampen eingesetzt werden. Stützkonstruktionen sind oft notwendig, um zum einen ein Absinken von bereits verfestigten Bauteilen in das Pulverbett zu vermeiden. Des Weiteren wird durch die Stützstrukturen

(auch Support genannt) die eingebrachte Wärme der Energiequelle abgeführt, was einem ungleichmäßigen Temperaturverlauf entgegenwirken soll.

Werkstoffextrusion

Ausgangswerkstoff ist in dieser Verfahrensgruppe ein Filament oder eine Paste, welche erwärmt wird und über eine Düse gezielt aufgetragen wird. Alternativ erfolgt die Anbindung über eine chemische Reaktion zwischen den Komponenten. Überhängende Bereiche müssen mit Stützkonstruktion versehen werden.

Gerichtete Energieeinbringung

Der Werkstoff wird durch eine Zuführeinheit in die Prozesszone eingebracht und mittels einer fokussierten Wärmequelle mit dem bereits aufgebauten Bauteilbereich verschmolzen. Der Ausgangswerkstoff kann in Pulver oder Drahtform vorliegen. Die Bauplatte kann zudem auf einem schwenkbaren Bautisch montiert sein, wodurch es möglich ist, die Aufbaurichtung zu verändern. Entsprechend sind keine Stützkonstruktionen notwendig.

Schichtlaminierung

Eine Platte des Werkstoffs wird zunächst mithilfe eines Bindemittels auf der vorherigen Schicht fixiert. Anschließend wird mit einem Schneidegerät die Kontur geschnitten. Die Aktivierung der Verbindung erfolgt meist über eine örtliche oder großräumige Erwärmung. Die vorangehend genannten Verfahrensprinzipien sind in Abb. 5.4 dargestellt.

5.5 Vorstellung wichtiger Schichtbauverfahren

5.5.1 Laserstrahlschmelzen

Das Laserstrahlschmelzen (LBM), auch bekannt unter den Bezeichnungen Selective Laser Melting (SLM[®]) oder Direktes Metall-Laser-Sintern (DMLS[®]), kann in die Kategorie der pulverbettbasierten Schmelzverfahren eingeordnet werden. Wie bei allen Strahlschmelzverfahren liegt das Ausgangsmaterial in einem pulverförmigen Zustand vor. Zu Beginn des Prozesses wird eine Pulverschicht auf eine Bauplattform aufgebracht. Dies geschieht zum Beispiel mittels eines Rakels oder einer Walze. Der Pulver-

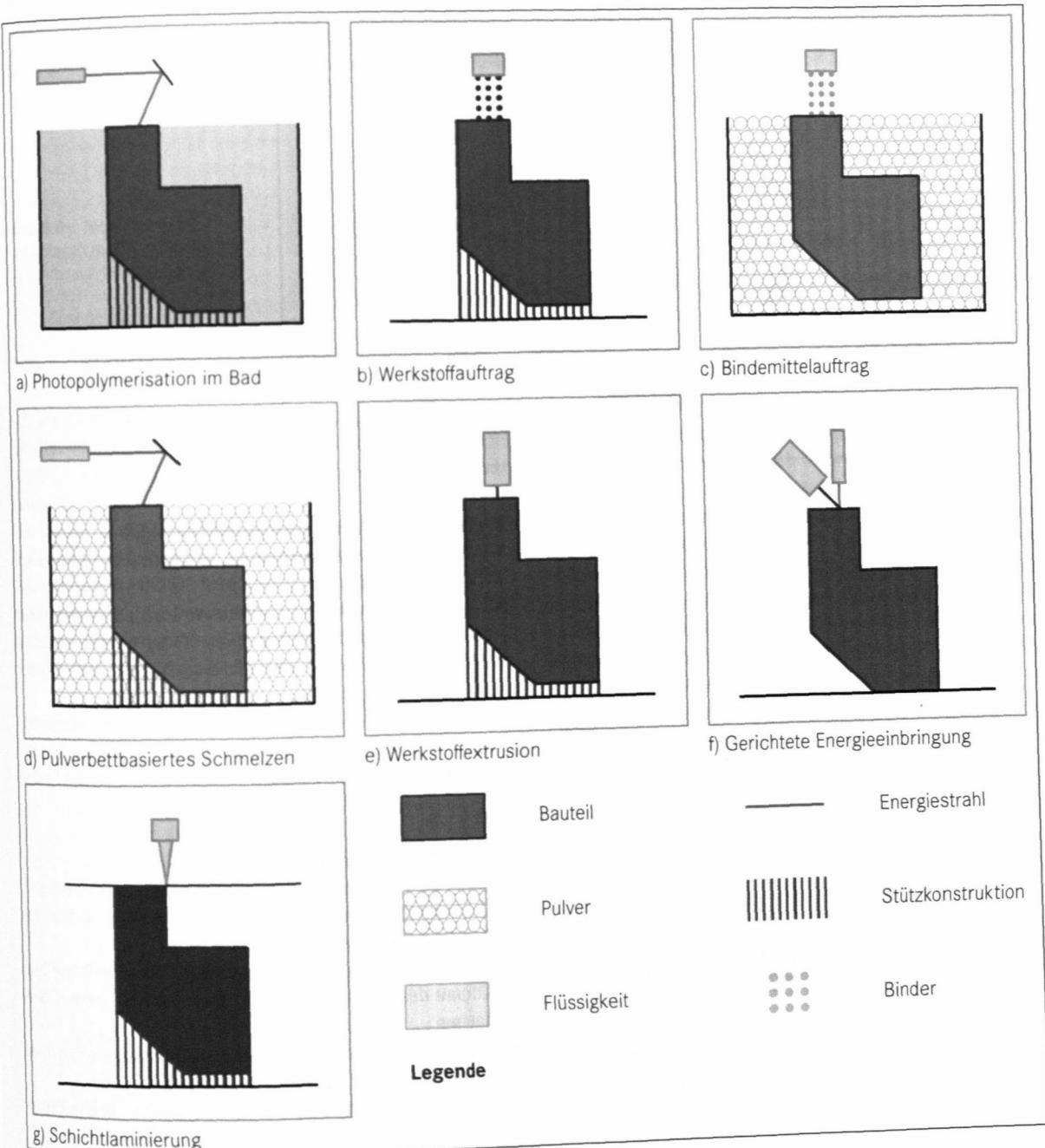


Abb. 5.4 Einteilung der additiven Fertigungsverfahren nach dem Kriterium des Verfahrensprinzips

werkstoff wird anschließend mittels eines Lasers lokal an den Stellen aufgeschmolzen, an denen das spätere Bauteil entstehen soll. Nach Abschluss des Belichtungsvorganges wird die Bauplattform um die Höhe einer Schichtdicke abgesenkt und eine neue Pulverschicht aufgetragen. In Abb. 5.5 ist der Verfahrensablauf beim Strahlschmelzen dargestellt.

Der Strahlschmelzprozess unterscheidet sich von den Sinterverfahren dadurch, dass das pulverförmige Ausgangs-

material vollständig in den schmelzflüssigen Zustand übergeht (VDI 3405). Dadurch kann ein nahezu porenfreies Bauteil erzeugt werden, welches in seinen Materialeigenschaften denen eines konventionell gefertigten (z. B. gegossenen) Bauteils des gleichen Materials ähnlich ist. Derzeit sind unterschiedliche Werkzeug- und Edelstähle, Aluminium- und Nickelbasislegierungen, Titan in Reinform und in verschiedenen Legierungszusammensetzungen sowie Gold als pulverförmige Ausgangsmaterialien

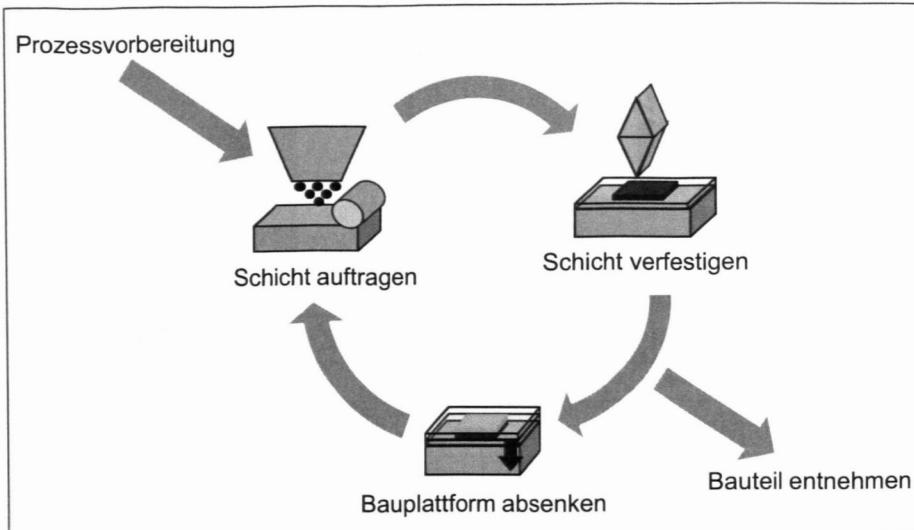


Abb. 5.5 Verfahrensablauf beim Strahlschmelzen

verfügbar und verarbeitbar (vgl. Kapitel IV.5.6.3). Die Materialpalette wird stetig in zahlreichen Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten erweitert.

Gerade im Bereich des Prototypenbaus und der Kleinserienfertigung können durch das Laserstrahlschmelzen einsatzfähige Bauteile für unterschiedliche Anwendungen wirtschaftlich hergestellt werden. Besonders in der Medizintechnik sowie im Werkzeug- und Formenbau gilt diese Technologie als wichtige wirtschaftliche Fertigungsalternative zur Herstellung von geometrisch komplexen Bauteilen und Funktionselementen, wie z.B. konturnahen Kühlkanälen. In weiteren Branchen, z.B. der Luft- und Raumfahrttechnik sowie der Automobilindustrie und dem Maschinen- und Anlagenbau, gewinnt dieses Verfahren nach wie vor stetig an Bedeutung. Das Laserstrahlschmelzen hat im Vergleich zum eng verwandten Elektrostrahlschmelzen allerdings den Nachteil der begrenzten Ablenkgeschwindigkeit des Laserstrahls. Dies hat drei Hauptgründe:

- Durch die mechanische Spiegeloptik zum Umlenken des Laserstrahls wird dessen Leistung durch die begrenzte thermische Belastbarkeit der Spiegelanordnung beschränkt.
- Durch die Massenträgheitsmomente in der Spiegeloptik wird die Ablenkgeschwindigkeit des Laserstrahls limitiert, da mit Zunehmen dieser die Genauigkeit der Verfahrwege beeinträchtigt wird.
- In Laserstrahlschmelzanlagen der neusten Generation wird diesem Problem durch den Einsatz mehrerer Laser begegnet. Dadurch kann die mögliche maximale Volumenaufbaurate gesteigert werden.

Vorteile des Strahlschmelzens:

- hohe geometrische Formgebungsfreiheit
- dünne Wandstärken realisierbar

- einsatzfähige Funktionsbauteile herstellbar
- Realisierung innen liegender, konturnaher Temperierkanäle möglich
- Verarbeitung von Werkstoffen, welche aufgrund ihrer thermischen und mechanischen Materialeigenschaften durch konventionelle Verfahren nicht oder nur schwer zu verarbeiten wären
- weitgehende Wiederverwendbarkeit des nicht verfestigten Pulverwerkstoffs
- einsetzbar für eine Vielzahl von Eisen- und Nicht-Eisenmetallen

Nachteile des Strahlschmelzens:

- Supportstrukturen an Bauteilüberhängen notwendig
- Verwendung einer Bauplattform notwendig, welche im Post-Prozess abgetrennt werden muss
- Auftreten des Stufeneffekts durch den schichtweisen Aufbau des Bauteils, dadurch teilweise sehr rau e Oberflächen
- hohe Herstellkosten für ein Bauteil bei langen Prozesszeiten
- Eigenspannungen im Bauteil infolge hoher Temperaturgradienten in der Prozesszone
- begrenzter Bauraum und somit begrenzte Bauteilgröße (derzeit etwa $800 \times 400 \times 500 \text{ mm}^3$)

Abb. 5.6 gibt einen Überblick über die spezifischen Prozessparameter ausgewählter Laserstrahlschmelzanlagen. Hieraus wird ersichtlich, dass die derzeit zur Verfügung stehenden Bauräume Volumina von ca. $13\,000 \text{ cm}^3$ bis $30\,000 \text{ cm}^3$ aufweisen. Darüber hinaus unterscheiden sich die für das Strahlschmelzen erhältlichen Anlagen bezüglich der eingesetzten Lasersysteme, woraus Unterschiede in der realisierbaren Schichtdicke und Aufbaurate resultieren.

Systemhersteller	EOS GmbH	ConceptLaser GmbH	SLM Solutions AG
System	EOS M 290	M2 Cusing	SLM 280 2.0
Laserart	Yb-Faserlaser	Yb-Faserlaser	IPG-Faserlaser
Laserleistung	400 W	200 W optional 400 W	400, 700 oder 1000 W
Bauraumgröße	250 x 250 x 325 mm ³	250 x 250 x 280 mm ³	280 x 280 x 365 mm ³
Schichtdicke	20 – 100 µm	20 – 80 µm	20 – 75 µm
Scangeschwindigkeit	bis zu 7 m/s	bis zu 7 m/s	bis zu 10 m/s
Aufbaurate	2 cm ³ /h – 20 cm ³ /h	2 cm ³ /h – 20 cm ³ /h	2 bis zu 55 cm ³ /h

Abb. 5.6 Technische Daten von Anlagen metallverarbeitender Schichtbauverfahren (ConceptLaser GmbH 2017, EOS GmbH 2017, SLM Solutions AG 2017)

5.5.2 Elektronenstrahlschmelzen

Beim Electron Beam Melting (EBM) wird statt eines Laserstrahls ein Elektronenstrahl verwendet. Die erzielbare Volumenaufbaurate liegt mit dem EBM-Verfahren deutlich höher als beim LBM (vgl. Abb. 5.7).

Bei dieser Form der Bearbeitung wird eine sogenannte Elektronenstrahlkanone als Strahlquelle verwendet. Im Bereich der Strahlführung und -formung werden elektromagnetische Linsen zur Fokussierung und Ablenkung genutzt. Der Arbeitsbereich befindet sich in einer Vakuumkammer, welche ein Streuen des Elektronenstrahls

verhindert. In dieser Kammer sind der Pulvvorratsbehälter, der Auftragsmechanismus sowie die Bauplattform angeordnet.

Durch die hohe Ablenkgeschwindigkeit und die höhere Leistungsdichte im Vergleich zum LBM ergeben sich zudem Potentiale für eine verbesserte Prozessführung. Wegen der genannten Vorteile wird derzeit das EBM-Verfahren detailliert untersucht und weiterentwickelt, um zukünftig eine größere Durchdringung in der industriellen Anwendung zu erreichen.

Die Vor- und Nachteile gestalten sich analog zu denen des Laserstrahlschmelzens. Als Vorteile gegenüber dem LBM-

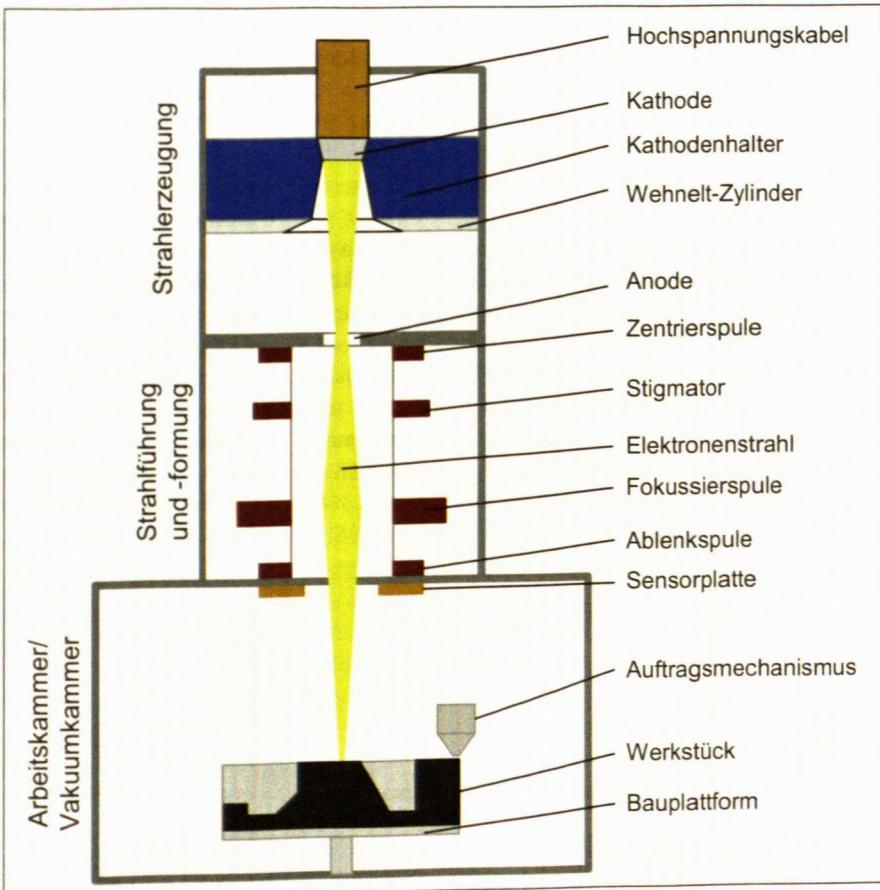


Abb. 5.7 Aufbau einer EBM-Anlage

Prozess sind, wie bereits oben erwähnt, die kürzere Prozesszeit bei gleichem Bauteil sowie die sehr gute Verarbeitbarkeit hochfester Legierungen wie z.B. der Titanlegierung Ti6Al4V zu nennen.

5.5.3 Laser-Sintern

Das Laser-Sintern (LS) – auch bekannt unter der Bezeichnung Selektives Laser-Sintern (SLS®) – ähnelt vom Grundprinzip dem Laserstrahlschmelzen, allerdings werden beim Laser-Sintern in der Regel Kunststoffe (z.B. Polyamid12 PA12) verarbeitet, wohingegen das LBM-Verfahren üblicherweise für Metalle angewandt wird. Auch das Laser-Sintern ist ein schichtweiser Bauprozess. Das pulverförmige Ausgangsmaterial wird im Bauraum bis knapp unterhalb der Schmelztemperatur erhitzt (ca. 180 °C bei PA12). Anschließend wird über einen Laserstrahl die nötige Restenergie eingebracht, um das Pulver lokal aufzuschmelzen. Einige Anlagenhersteller verwenden zusätzliche Infrarot-Heizstrahler, welche die oberste, also zuletzt aufgetragene Pulverschicht bestrahlen, um dadurch noch näher an die Schmelztemperatur zu gelangen. Der Auftrag des Pulvers der nächsten Schicht erfolgt analog zum Laserstrahlschmelzen mit einem Rakel oder einer Walze. Mittels Laser-Sintern können gegenwärtig Teile bis zu einer Größe von ca. $700 \times 380 \times 560$ mm³ realisiert werden. Da beim LS-Prozess in der Regel keine Stützstruktur erforderlich ist, liegt die Formgebungs freiheit höher als beim Laserstrahlschmelzen. Es können somit Teile mit sehr hoher Komplexität hergestellt werden. Im Gegensatz zum LBM können auch Funktionen wie z.B. Gelenke gefertigt werden. Die gängigen Materialien für den Laser-Sinterprozess sind vor allem Thermoplaste wie zum Beispiel Polyamid, Polystyrol und Polycarbonat anzuführen. Nach dem Verarbeitungsprozess kann das nicht verfestigte Material in der Regel wiederverwendet werden. Dabei ist zu beachten, dass das Pulver je nach Werkstoff und Alterungszustand vor der erneuten Verarbeitung immer mit Neupulver gemischt werden sollte. Der empfohlene Neupulveranteil liegt im Bereich zwischen 20 % und 70 %. Weiterhin wird das Ausgangsmaterial z.B. mit einem Sieb geeigneter Maschenweite gesiebt, um größere, im Fertigungsprozess versinterte Agglomerate von den Partikeln mit kleinerem Durchmesser zu trennen.

Vorteile des Laser-Sinterns:

- prinzipiell keine Stützstruktur erforderlich; Stützstrukturen werden teilweise zur Spannungskompensation und zur Fixierung der Bauteile eingesetzt
- Bauteile mit hoher Komplexität herstellbar
- Pulver größtenteils wiederverwendbar
- niedrige Kosten für Standardmaterialien im Vergleich zu Standardmaterialien beim LBM
- relative große Materialvielfalt im Vergleich zu anderen kunststoffverarbeitenden additiven Verfahren

Nachteile des Laser-Sinterns:

- An der Oberfläche anhaftende Partikel lösen sich bei Bauteilgebrauch ab.
- Porosität der Bauteile
- rauе Oberfläche
- Prozessstabilität von vielen Parametern abhängig (z.B. Temperaturschwankungen, Positionierung im Bauraum usw.)

5.5.4 Laserauftragschweißen

Das Laserauftragschweißen ist ein additives Fertigungsverfahren, bei welchem der Materialauftrag meist über ein Düsensystem erfolgt. Durch dieses System wird ein pulverförmiges Ausgangsmaterial mittels eines Schutzgasstroms zur Prozesszone transportiert. Dabei heizt der Laser das Pulver sowie die Prozesszone auf. Die Schmelzbildung findet im Prozess des Laserauftragschweißens durch das Erstarren der Schmelze primär in Folge der Wärmeableitung in das Bauteil statt. Die Zuführung des Ausgangsmaterials erfolgt über Düsen, welche das Pulver in einem Trägergas in die Prozesszone transportieren. Generell wird hier zwischen Off-axis- und On-axis-Düsen sowie Mischformen aus beiden Konzepten unterschieden. Die Positionierung von Off-axis-Düsen liegt außerhalb der Strahlachse (Abb. 5.8).

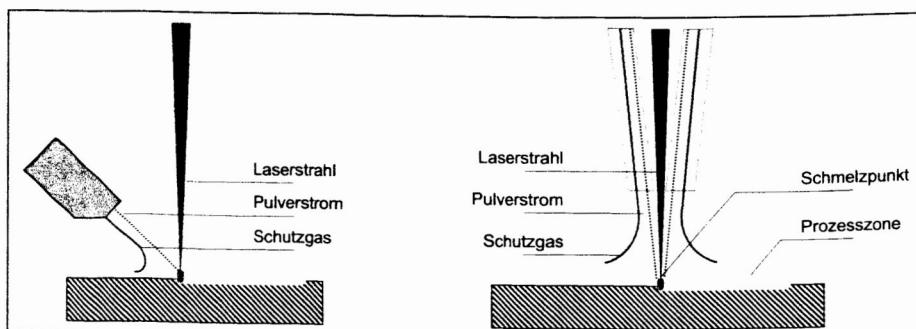


Abb. 5.8 Düsensysteme bei Laserauftragschweißen: off-axis (links) und on-axis (rechts)

Off-axis-Düsen zeichnen sich unter anderem dadurch aus, dass die Geometrie des Pulverstrahls anpassbar ist, und dass eine gute Zugänglichkeit der Düse zum Werkstück gegeben ist. Der Pulvernutzungsgrad liegt bei Off-axis-Düsen in der Regel zwischen 50 % und 70 %.

On-axis-Düsen lassen durch die gute Fokussierbarkeit, die Richtungsunabhängigkeit von der Vorschubrichtung sowie einen hohen Pulvernutzungsgrad von bis zu 80 % charakterisieren. Neben dem pulverförmigen Ausgangsmaterial kann auch ein Draht, der an der Fügestelle dem Laser hinzugeführt wird, verwendet werden.

Das Laserauftragschweißen wird in vielen Fällen für Reparaturzwecke eingesetzt, allerdings können mit diesem Verfahren auch spur- und schichtweise Bauteile aufgebaut werden. Die gefertigten Bauteile können Abmessungen von bis zu $1400 \times 1200 \times 800 \text{ mm}^3$ erreichen. Häufig eingesetzte Materialien sind Werkzeug- und korrosionsbeständige Stähle, Nickel-, Titan- und Kobaltlegierungen sowie Wolframkarbid und Titankarbid.

Vorteile des Laserauftragschweißens:

- 5-Achs-Bearbeitung möglich
- Aufbau nicht an Einzelschichten gebunden
- spanende Bearbeitung während des Aufbauprozesses in derselben Anlage möglich (hybride Fertigung)
- Weiterbearbeitung von Halbzeugen möglich
- in den meisten Fällen keine Stützstruktur erforderlich
- schneller Werkstückaufbau bzw. hohe Volumenerzeugungsrate im Vergleich zu pulverbettbasierten Verfahren

Nachteile des Laserauftragschweißens:

- geringes räumliches Auflösungsvermögen (im Vergleich zu LBM, SL, 3DP)
- hoher thermischer Verzug und Spannungen im Bauteil möglich
- Schutzgasatmosphäre bei reaktiven Materialien erforderlich
- rauе Oberfläche

5.5.5 3D-Drucken

Das 3D-Drucken (3D Printing, 3DP) ist ein additives Verfahren, bei dem gezielt flüssiger Binder mithilfe eines Druckkopfes oder einer Düse in ein Pulverbett eingebracht wird. Durch wiederholtes Absenken der Bauplattform und anschließendes Auftragen einer dünnen Pulverschicht entsteht dabei schichtweise ein Bauteil. Durch die entsprechende Wahl der Pulver-Binder-Kombination ist eine breite Werkstoffvielfalt verarbeitbar, welche sich von Kunststoffen über Keramiken und Sand (für Gussformen) bis hin zu Metallen erstreckt. Durch die Verwendung eines im Vergleich zum Lasersystem kostengünstigen Druck-

kopfes entstehen erhebliche Kostenvorteile gegenüber laserbasierten Verfahren. Für Kunststoffbauteile werden die Modelle nach dem Bau durch Infiltration, beispielsweise mit Epoxidharz oder Wachs, nachbehandelt, um die mechanischen Eigenschaften zu verbessern. Bei der Verarbeitung von Metallpulver wird das Material durch eine Bindersubstanz verbunden und zu einem Grüning verfestigt, welcher anschließend wärmebehandelt und beispielsweise mit Bronze infiltriert werden kann.

Vorteile des 3D-Druckens:

- hohe Volumenerzeugungsrate
- viele Werkstoffe verarbeitbar
- große Bauräume möglich (bis etwa $4000 \times 2000 \times 1000 \text{ mm}^3$)
- beträchtliche Anzahl an Anlagenherstellern
- farbige Bauteile herstellbar
- kostengünstiges Verfahren im Vergleich zu laserbasierten Verfahren
- keine Stützstruktur erforderlich
- Restpulver wiederverwendbar

Nachteile des 3D-Druckens:

- geringe Oberflächenqualität
- verhältnismäßig schlechte mechanische Eigenschaften aufgrund geringer Dichte im Vergleich zum Laser-Sintern
- in der Regel Wärmebehandlung zur Bauteiltrocknung erforderlich
- Schwindung und Verzug durch chemische Reaktion bei der Verfestigung möglich

5.6 Richtlinien für die Konstruktion additiver Bauteile

Im Folgenden soll auf Gestaltungsrichtlinien für eine additiv-gerechte Konstruktion eingegangen werden. Hierbei werden die Bereiche Funktionsintegration, Bauteilgröße, Positionierung, verarbeitbare Werkstoffe, mechanische Kennwerte, Aufmaß und Oberfläche, Treppenstufeneffekt, Wandstärke sowie Support und Maßhaltigkeit mit Fokus auf das additive Fertigungsverfahren Strahlschmelzen angesprochen.

5.6.1 Funktionsintegration

Additive Fertigungsverfahren besitzen durch den schichtweisen Aufbau im Vergleich zu konventionellen, trennen-

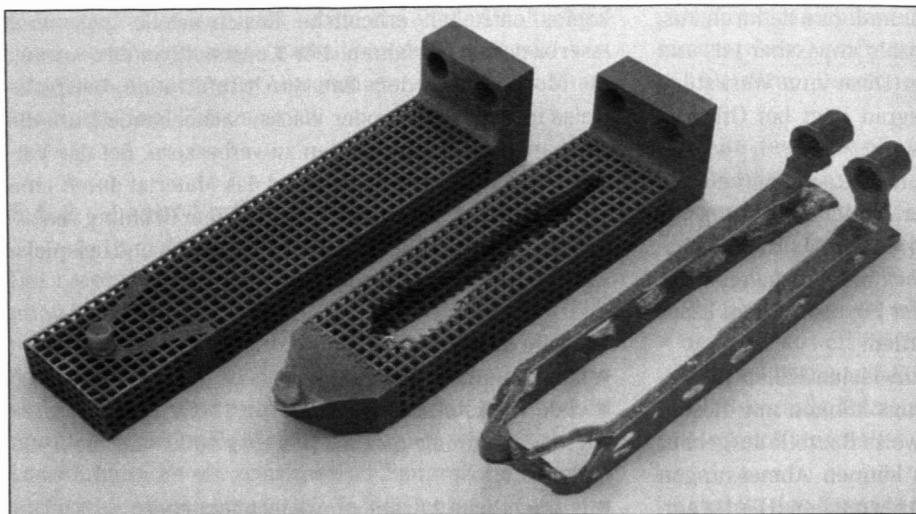


Abb. 5.9 Verschiedene Stufen der Topologieoptimierung einer Halterung unter Verwendung von Gitterstrukturen, hergestellt mittels Strahlschmelzen

den Verfahren zusätzliche geometrische und technologische Freiheitsgrade. So ist es möglich, verschiedene Funktionen in ein additiv gefertigtes Bauteil zu integrieren. Hierzu zählen beispielsweise:

- Leichtbaustrukturen
- Aufbau von Materialkombinationen
- Integration von Bewegungsfreiheitsgraden
- Generierung spezifischer Bauteileigenschaften
- konstruktive Gestaltungsfreiheiten.

Leichtbaustrukturen

Der schichtweise Aufbau der vorgestellten Prozesse ermöglicht es, komplexe Bauteile in kurzer Zeit zu fertigen. Dabei ist die enge Verzahnung der Konstruktionsprogramme mit dem Fertigungsprozess sehr von Vorteil. So können filigrane, wiederkehrende Strukturen in entsprechenden CAD-Systemen konstruiert und aufgebaut werden. Die berechnete Bauteilstruktur lässt sich durch die Anlagenschnittstelle in den Prozess übertragen und vollautomatisch aufbauen. Der Gestaltung der Muster sind dabei nahezu keine Grenzen gesetzt. So sind topologieoptimierte Strukturen, regelmäßig wiederkehrende Gitterstrukturen, aber auch massive Bereiche möglich. Diese können beliebig miteinander kombiniert werden (Abb. 5.9 Mitte).

Materialkombinationen

Durch die werkzeuglose Fertigung der Schichtbauprozesse ist es möglich, unterschiedliche Materialien zu einem Bauteil zusammenzufügen. Im Bereich des Strahlschmelzens können zwei oder mehr Materialien zu einem Bauteil verschmolzen werden. Eine wesentliche hier geltende Restriktion ist die Schmelzbarkeit des Werkstoffs. Durch die sog. Hybridbauweise kann auf einem bestehenden Bauteil

mit ebener Fläche (Abb. 5.10 links) mit neuem Material weitergebaut werden. Dies hat zwei Vorteile: Zum einen ist es möglich, die Vorteile zweier Fertigungsverfahren (z. B. abtragend und additiv) zu kombinieren. So ist die konventionelle Fertigung bei großvolumigen und einfachen Strukturen von Vorteil. Nimmt die geometrische Komplexität zu, so kann das Bauteil additiv fortgesetzt werden. Zum anderen können die Werkstoffe, ohne Kompromisse eingehen zu müssen, nach den Anforderungen ausgewählt werden. Auf diese Weise können stark beanspruchte Oberflächen mit einem verschleißbeständigen Material versehen werden, wodurch sich beispielsweise die Standzeit verlängert (Abb. 5.10 rechts).

Integration von Freiheitsgraden

Ein anschauliches Beispiel für die Integration von translatorischen bzw. rotatorischen Freiheitsgraden stellen Gelenke dar. Das selektive Laser-Sintern ermöglicht es beispielsweise, ohne zusätzlichen Fertigungsaufwand die in Abb. 5.11 abgebildete Baugruppe aufzubauen. Bei der konventionellen Fertigung sind zwei Halbschalen herzustellen, die miteinander verbunden werden (Abb. 5.11 links). Durch die additive Fertigung entfällt die Herstellung der Halbschalen und sie reduziert sich auf ein Gehäuse, welches das Verbindungsstück bereits enthält (Abb. 5.11 rechts). Hierbei ist allerdings zu beachten, dass aufgrund bestehender Prozessdefizite nicht nachbearbeitete Flächen u. U. hohe Rauigkeiten aufweisen können, die Funktionalitätseinbußen zur Folge haben.

Generierung spezifischer Bauteileigenschaften

Neben Freiheitsgraden können auch die festen Strukturen bei Schichtbauprozessen verschiedenartig aufgebaut werden. Spezifische Bauteileigenschaften können beispiels-

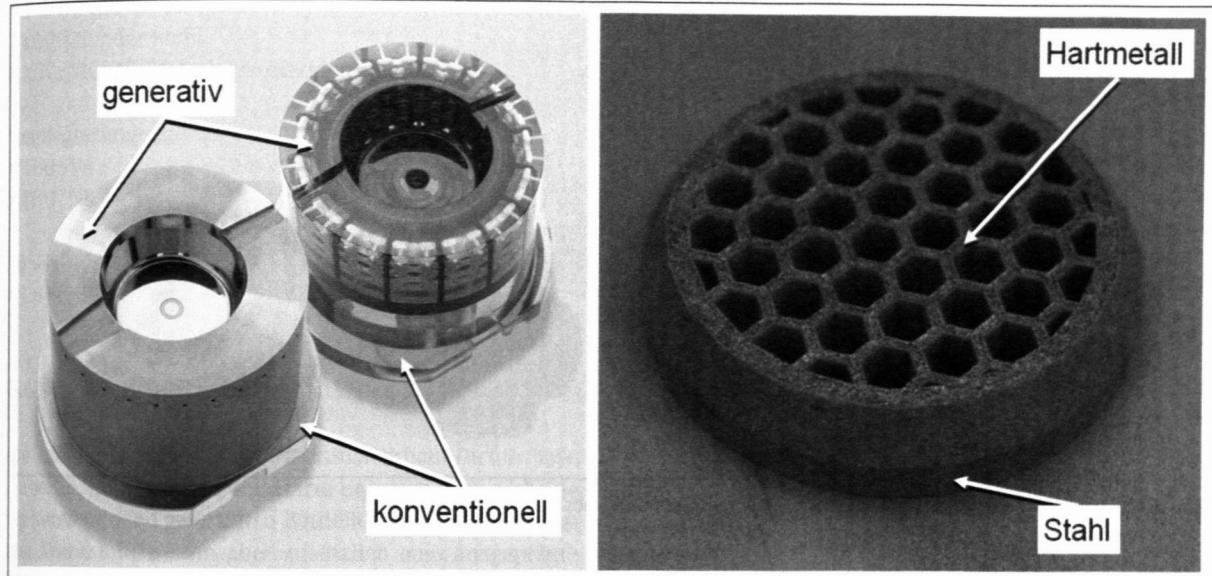


Abb. 5.10 Links: Werkzeugform Einsatz zur Herstellung von optischen Linsen, aufgebaut durch Hybridbauweise (Kombination von konventionellen und additiven Fertigungsverfahren; Werkzeugbau Siegfried Hofmann GmbH); rechts: Hybridbauweise durch die Kombination von Stahl und Hartmetall (WC/Co)

weise über bewusst erzeugte Porosität beeinflusst werden. Dies kann sowohl für flächig durchlässige Belüftungsöffnungen (z.B. im Automobil) oder durch bewusst herabgesetzte Festigkeitswerte in Bauteilbereichen (z.B. Sollbruchstelle) genutzt werden.

Eine weitere Besonderheit der Schichtbauverfahren ist die zum Teil gegebene Möglichkeit der flexiblen Farbgebung der Bauteile. Das 3D-Drucken bietet die Möglichkeit, farbige Modelle zu generieren (Abb. 5.12). Die einzelnen Farben werden durch unterschiedliche Binder, vergleichbar dem Tintenstrahldrucker, erzeugt.

Konstruktive Gestaltungsfreiheiten

Aufgrund des schichtweisen Vorgehens können hochkomplexe Bauteile gefertigt werden. Den geometrischen Rand-

bedingungen der Bauteilstrukturen sind dabei nahezu keine Grenzen gesetzt. So können zum Teil Baugruppen, die bisher aus mehreren Teilen montiert bzw. gefügt werden mussten, in einem Arbeitsschritt gefertigt werden. Die Montage bzw. das Fügen entfällt somit, jedoch muss beachtet werden, dass eine Demontage unter Umständen nicht möglich ist.

Darüber hinaus können Bohrungen strömungsoptimiert und oberflächennah ausgelegt werden. Dies ist vor allem im Werkzeug- und Formenbau von Bedeutung, um die Qualität und Zykluszeiten zu optimieren. So können Bohrungen auch mit verschiedenen Querschnitten ausgelegt werden. Es sind neben der kreisförmigen Geometrie auch rechteckige oder ovale Formen möglich.

IV

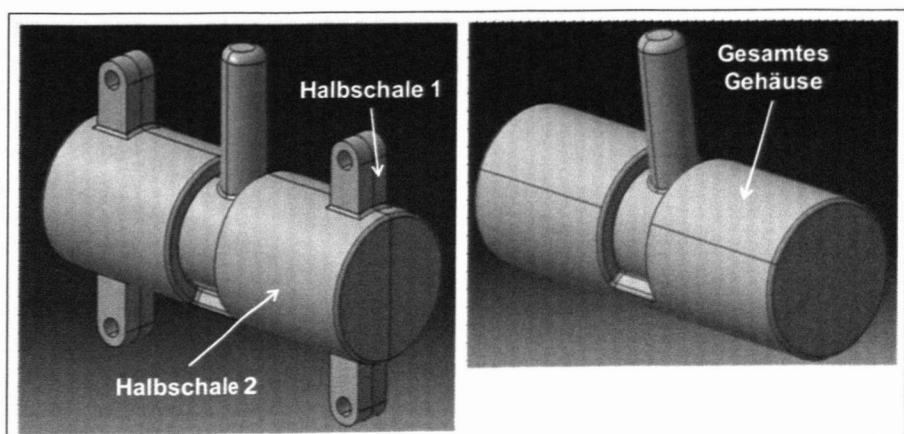


Abb. 5.11 Konventionell (links) und additiv-gerecht (rechts) konstruiertes Gelenk

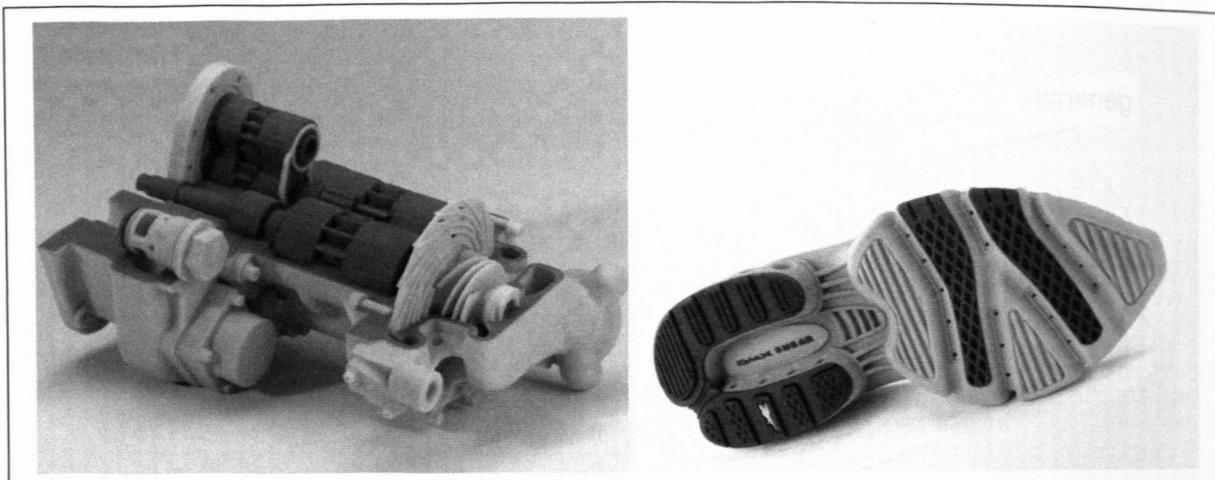


Abb. 5.12 Farbige Modelle (Getriebe und Turnschuh) aus dem 3D-Druckprozess (ZCorporation)

5.6.2 Bauteilgröße und Bauteilpositionierung

Die Bauteilgröße wird vom nutzbaren Bauraumvolumen limitiert. Hierbei muss beachtet werden, dass zur Befestigung der Grundplatte in vielen Fällen Schrauben benötigt werden, die eine Reduzierung des effektiven BauRaums zur Folge haben. Dies macht eine entsprechende Dimensionierung und Positionierung des Bauteils notwendig. Abb. 5.13 links zeigt beispielhaft ein Bauteil, welches die zum Einbau in die Strahlschmelzanlage benötigten Bohrungen der Bauplattform verdeckt. In Abb. 5.13 rechts ist das angepasste Bauteil mit maximaler Grundfläche zu sehen.

5.6.3 Verarbeitbare Werkstoffe

Abhängig von den Anforderungen an das Bauteil stehen eine Reihe unterschiedlicher Werkstoffe zur Verfügung,

welche teilweise speziell für das Strahlschmelzen entwickelt worden sind. Im Folgenden werden Auszüge der derzeit am Markt verfügbare Metallegierungen genannt. Aluminiumlegierungen:

- AlSi10Mg
- AlSi12

Kobaltlegierungen:

- EOS CobaltChrome MP1 CoCrMo (Zusammensetzung nach ASTM F1537)

Nickelbasislegierungen:

- Inconel IN718
- Inconel IN625
- Inconel IN939

Stähle:

- 1.4542 rostfreier Edelstahl
- 1.4404 (X2CrNiMo 17 12 2) nichtrostender austenitischer Stahl

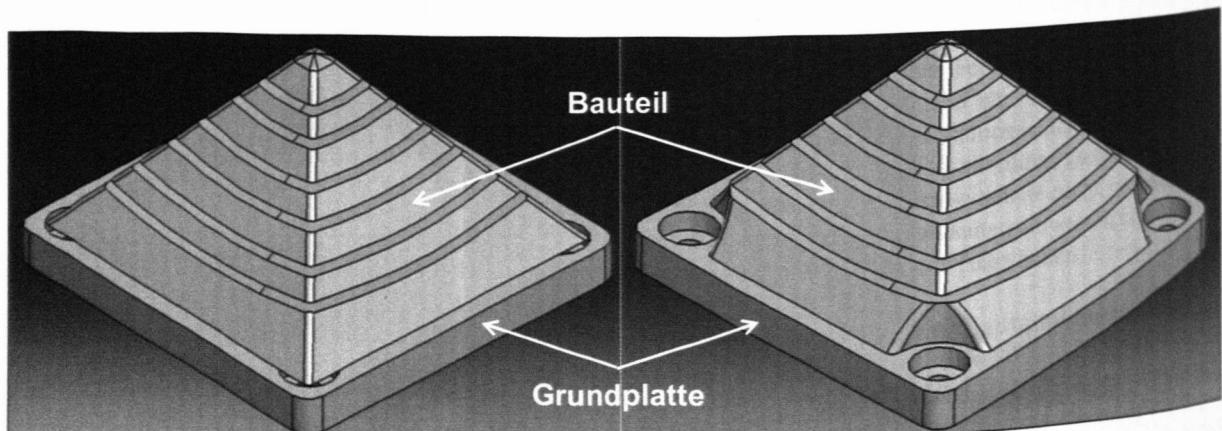


Abb. 5.13 Ungünstige (links) und günstige (rechts) Bauteilkonstruktion in Abhängigkeit von der Grundplatte

- 1.2709 (X3NiCoMoTi 18 9 5) hochfester martensitischer austenitischer Stahl
- X5CrNiCuNb16-4 nichtrostender Stahl

Titanlegierungen:

- TiAl6V4
- TiAl7Nb

Kupferlegierung:

- CuNi2SiCr

5.6.4 Mechanische Kennwerte

Die mechanischen Kennwerte hinsichtlich Dichte bzw. Porosität, Zugfestigkeit und Härte unterscheiden sich wie bei konventionell gefertigten Bauteilen je nach verarbeitetem Werkstoff, weisen aber zusätzlich eine ausgeprägte Abhängigkeit von den Prozessparametern auf (u.a. der Strahleistung und der Strahlgeschwindigkeit). Ist eine hohe Zugfestigkeit in eine bestimmte Richtung erwünscht, so ist unbedingt die Orientierung des Bauteils im Raum zu beachten. Zur Veranschaulichung dient der in Abb. 5.14 dargestellte Zugstab. Dieser weist eine niedrigere Zugfestigkeit auf, wenn er senkrecht zur Schichtebene orientiert aufgebaut wird (Abb. 5.14 links). Deutlich höhere Zugfestigkeiten werden für den Fall erreicht, dass der Zugstab liegend in Schichtebenen-Richtung gefertigt wird.

5.6.5 Oberflächengüte und Aufmaß

Entscheidend für eine gute Oberfläche sind die Positionierung des Bauteils sowie die Beschaffenheit des Ausgangsmaterials (z.B. Korngröße). Wird eine Fläche parallel zur Grundplatte mit Orientierung nach oben angeordnet, so werden die bestmöglichen Oberflächengüten erzielt. Mit zunehmendem Winkel steigt die Rauheit. Maximale Oberflächenrauheitswerte besitzen Flächen, die nach unten in das Pulverbett orientiert sind. Pulverhaftungen sind für diese hohen Rauheitswerte verantwortlich. Durch geeignete manuelle oder automatisierte Nacharbeitsverfahren kann die Oberflächengüte im Anschluss an den additiven Fertigungsprozess gezielt eingestellt werden. Für den Fall, dass das Bauteil Funktionsflächen erhalten soll, muss unbedingt ein entsprechendes Aufmaß vorgesehen werden.

Neben der Oberflächenrauheit wird auch die minimale Wandstärke einerseits durch das Ausgangsmaterial, andererseits aber auch durch die Strahleigenschaften beeinflusst. Die Korngröße des Ausgangswerkstoffes gibt das minimal mögliche geometrische Auflösungsvermögen

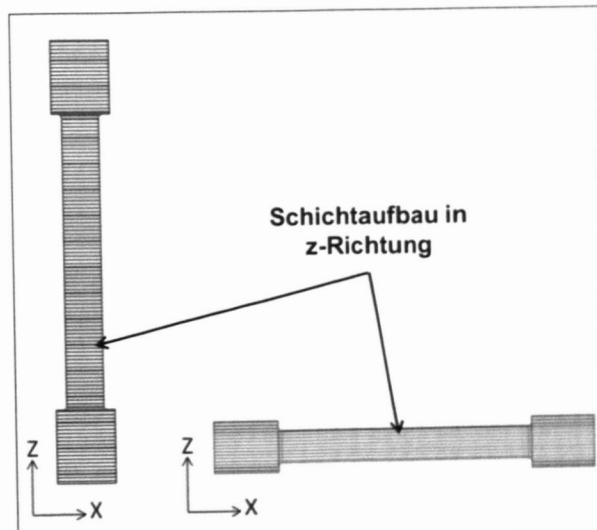


Abb. 5.14 Zugstab senkrecht zur Schichtebene (links) und Zugstab in Schichtebene liegend (rechts) aufgebaut

(z.B. Bohrungsdurchmesser) des Materials wieder. Auf der Seite des Prozesses wird dies durch die Form und Geometrie der Strahlquelle bestimmt. Beim Strahlschmelzen ist dies der Fokusdurchmesser des Elektronen- bzw. Laserstrahls. Je kleiner der Pulverkorn- bzw. Strahldurchmesser gewählt wird, desto hochauflösender kann gebaut werden.

5.6.6 Treppenstufeneffekt (Stair Casing)

Durch das schichtweise Verfestigen des Werkstoffes weisen die Bauteile quer zur Schichtebene andere Gestaltungseigenschaften als parallel zur Schichtebene auf. Da das Bauteil schichtweise in z-Richtung aufgebaut wird, sind bei Schrägen nur bestimmte, von der Schichtdicke abhängige Stufen möglich. Somit müssen Oberflächen, welche ohne Nacharbeit eine hohe Güte benötigen, orthogonal zur Aufbaurichtung liegen. Der Stufeneffekt ist direkt von der Schichtdicke abhängig (Abb. 5.15). Durch

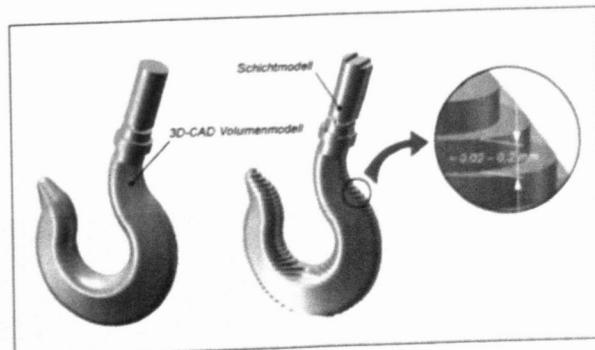


Abb. 5.15 Der Treppenstufeneffekt (Danjou 2009)

geschickte Bauteilorientierung, beispielsweise durch die Vermeidung spitzwinkriger Ebenen zur Bauplattform, kann der Stufeneffekt verminderd bzw. vermieden werden.

5.6.7 Supports und Maßhaltigkeit

Supports sind Stützelemente, die z.B. bei den ersten Schichten eines zu generierenden Überhangs benötigt werden, da dieser mit der Bauplattform oder mit bereits verfestigten Bauteilbereichen verbunden werden muss, um nicht vom Auftragsmechanismus verschoben zu werden und um die durch den Laser- oder Elektronenstrahl selektiv eingebrachte Energie gezielt abzuführen. Durch die Supportstruktur wird der Grad der Pulveranhäfungen reduziert. Stützelemente werden zusammen mit dem Bauteil gefertigt und später abgetrennt. Aus diesem Grund sollte Support nur an Stellen vorgesehen werden, an denen es unbedingt notwendig ist bzw. welche ohnehin nachbearbeitet werden müssen. Bei kleinen Abmessungen der Überhänge und bei Winkeln größer 45° kann, abhängig vom Werkstoff und den gewählten Prozessparametern, die nicht verfestigte Pulverschicht als Stützkonstruktion ausreichen. So können Bohrungen, welche im Inneren liegen (z.B. Temperierkanalstrukturen) ohne Stützkonstruktionen gefertigt werden.

Verzug bezeichnet die Maß- und Formänderung eines Werkstückes aufgrund von Temperaturänderungen während des Bauprozesses. Additiv gefertigte Produkte sind starken Temperatureinflüssen ausgesetzt und können daher ausgeprägte Verzüge erfahren. Unterschiedliche Belichtungsmethoden können ebenso wie Supports diesbezüglich Abhilfe schaffen. Des Weiteren muss die Bauteilorientierung beachtet werden. Abb. 5.16 zeigt links einen sogenannten T-Träger, welcher mithilfe von Supportstrukturen aufgebaut worden ist. Im rechten Teil von Abb. 5.16 ist der frei geschnittene Träger dargestellt, bei welchem aufgrund herstellungsbedingt induzierter Eigenspannungen Verformungen aufgetreten sind.

5.7 Potenziale

Durch die Anwendung additiver Fertigungsverfahren erschließen sich im Vergleich zu konventionellen Herstellungsverfahren vielfältige Potentiale und Möglichkeiten. So können beispielsweise freigeformte Kanäle hergestellt werden, welche u.a. in Form von konturnahen Temperiersystemen in Spritzgießformen eingesetzt Anwendung finden. Durch die gezieltere Werkzeugtemperierung wird es hiermit ermöglicht, komplexere Bauteile mit geringerem Verzug und besseren Oberfläche herzustellen, um die Zykluszeiten zu verringern.

Mithilfe von additiven Fertigungsverfahren lassen sich sowohl fließende Übergänge von runden auf eckige Geometrien als auch innen liegende filigrane Strukturen realisieren, welche hinsichtlich Strukturleichtbau enormes Potential aufweisen. Dabei kann eine automatische Topologieoptimierung durch die vorgelagerte CAD/CAM-Kopplung erfolgen. Darüber hinaus ermöglicht die durchgängige, integrierte Prozesskette die direkte Fertigung von kundenindividuellen Bauteilen. Im Gegensatz zu konventionellen Fertigungsverfahren zeichnen sich die additiven durch eine weitgehende Unabhängigkeit der Wirtschaftlichkeit und der Herstellungsdauer von der geometrischen Komplexität aus. Bezuglich wirtschaftlichen Aspekten ist das Bauteilvolumen der entscheidende Faktor, welcher die Bauzeit und damit die anfallenden Herstellkosten bestimmt.

5.8 Zusammenfassung und Ausblick

Additive Fertigungsverfahren können sehr gut für die Herstellung von Prototypen, Formwerkzeugen und Endprodukten eingesetzt werden. In allen Fällen muss das zu produzierende Bauteil zunächst als 3D-CAD-Modell vorliegen. Die Produktion kann, in Abhängigkeit des späteren Verwendungszwecks, mit sehr unterschiedlichen Schichtbauprozessen erfolgen. Dabei weisen die unterschiedlichen additiven Fertigungsverfahren technologie-

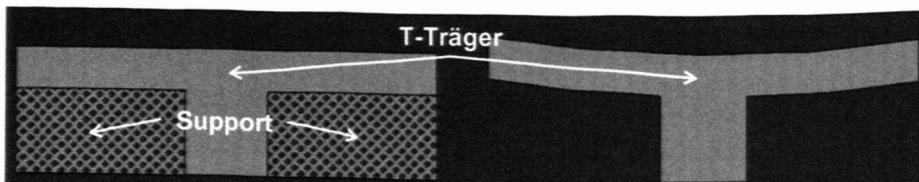


Abb. 5.16 T-Träger vor dem Freischneiden (links) und T-Träger nach dem Freischneiden (rechts)

spezifische Besonderheiten auf, welche bereits in der Konstruktionsphase Berücksichtigung finden müssen. Neben den aufgelisteten Verfahren existieren noch weitere, die sich jedoch nur geringfügig von den hier erwähnten unterscheiden.

Aktuelle Entwicklungen der additiven Fertigungsverfahren in der Industrie und Forschung sind sehr mannigfaltig. So wird u.a. mit einer Beschleunigung des Fertigungsprozesses, z.B. durch höhere Laserleistungen und den Einsatz mehrerer Laser in einer Anlage, angestrebt, größere Aufbauraten zu erreichen. Darüber hinaus müssen nach dem additiven Herstellungsprozess für eine ausreichende Qualität der Bauteile weitere Nacharbeitsschritte erfolgen. Damit steht sowohl die Prozessrobustheit als auch die Absicherung der Bauteilqualität im Fokus der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. Die stetige Erweiterung des verarbeitbaren Materialportfolios führt dazu, dass sich durch additive Fertigungsverfahren kontinuierlich neue Anwendungsgebiete erschließen lassen.

5.9 Weiterführende Informationen

Literatur

- Bourell, D.L., Leu, M.C., Rosen, D.W.:* Roadmap for Additive Manufacturing. Identifying the Future of Freeform Processing. 2009. <https://wohlersassociates.com/roadmap2009A.pdf>
- ConceptLaser GmbH:* Anwendungen des LaserCUSING für die Herstellung funktionaler Bauteile. 2010. <http://www.concept-laser.de>
- Danjou, S., Köhler, P.:* Ermittlung optimaler Bauteilorientierung zur Verbesserung der Prozessplanung in der CAD/RP-Kette. In: RTejournal Ausgabe 6, 2009. Universität Duisburg-Essen. <https://www.rtejournal.de/ausgabe6/2210/ArtikelPDF.pdf>

Ederer, I.: Oberflächenverbesserung im 3D-Druck mittels höherer Auflösung. RTejournal Ausgabe 5, 2008. Voxeljet technology GmbH. <http://www.rtejournal.de/ausgabe5/1515>

Gebhardt, A.: Generative Fertigungsverfahren. Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing. Hanser Verlag, München, 3. Auflage, 2007

Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B.: Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. New York, 2nd Edition, 2015

Witt, G.: Taschenbuch der Fertigungstechnik. Hanser Verlag, München, 1. Auflage, 2006

Wohlers, T.: Wohlers Report. Wohlers Associates, Fort Collins, Colorado, 2017

Zäh, M.F.: Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien. Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren. iwb Anwendenzentrum Augsburg, TU München/Hanser Verlag, München, 2006

Richtlinien

VDI 3405: Additive Fertigungsverfahren. Beuth Verlag, Berlin, 2014

DIN EN ISO 17296-2: Additive Fertigung – Grundlagen. Beuth Verlag, Berlin 2016

Datenblätter

EOS GmbH: Systemdatenblatt EOS M 290. 2017. https://cdn3.scrvvt.com/eos/614aa94172c543b6/6995db5897b5/EOS_System_Data_Sheet_EOS_M_290_DE_V3_Web.pdf

ConceptLaser GmbH: Systemdatenblatt ConceptLaser M2 Cusing. 2017. https://www.concept-laser.de/fileadmin/Blaue_Broschueren/I708_M2_Multilaser_DE_update_1_Eigendruck_X3.pdf

SLM Solutions AG: Technische Spezifikation SLM 280 2.0. 2017. <https://slm-solutions.de/produkte/maschinen/selective-laser-melting-maschine-slm-280-20>