

## Additive Fertigungsverfahren

**Hans B. Kief, Michael Ott, Johannes Schilp, Michael F. Zäh**

### **Angaben zur Veröffentlichung / Publication details:**

Kief, Hans B., Michael Ott, Johannes Schilp, and Michael F. Zäh. 2017. "Additive Fertigungsverfahren." In *CNC-Handbuch: CNC, DNC, CAD, CAM, FFS, SPS, RPD, LAN, CNC-Maschinen, CNC-Roboter, Antriebe, Energieeffizienz, Werkzeuge, Industrie 4.0, Fertigungstechnik, Richtlinien, Normen, Simulation, Fachwortverzeichnis*, edited by Hans B. Kief, Helmut A. Roschiwal, and Karsten Schwarz, 373–94. München: Hanser.  
<https://doi.org/10.3139/9783446452657.015>.

### **Nutzungsbedingungen / Terms of use:**

licgercopyright



# 2

# Additive Fertigungsverfahren

Hans B. Kief, Michael Ott, Johannes Schilp, Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh

**Additive Fertigungsverfahren beruhen auf dem Grundgedanken des schichtweisen Aufbaus von Bauteilen, d. h. das Bauteil wird durch die Erzeugung einzelner Schichten additiv aufgebaut. Die Fertigung der Geometrien erfolgt aus formlosen (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.**

## 2.1 Einführung

Nachdem die generativen Fertigungsverfahren erstmalig 1987 in den USA der Öffentlichkeit vorgestellt wurden, konnten die ersten Maschinen in den Jahren 1989 – 1990 nach Europa und Deutschland ausgeliefert werden. Damals handelte es sich vor allem um Stereolithographie (SLA) Maschinen. Im Laufe der folgenden Jahre entstanden weitere Prozessvarianten u. a. das Selektive Lasersintern (SLS), das Strahlschmelzen und das Laminated Object Manufacturing (LOM). Auf Basis der bekannten Prozesse (vgl. auch Abschnitt 2.4) werden in den nächsten Jahren noch neue bzw. modifizierte Verfahren (weiter) entwickelt, da das Potential der generativen Fertigung z.B. in der Multimaterialverarbeitung noch nicht ausgeschöpft ist.

Der Prozessablauf lässt sich wie folgt zusammenfassen (vgl. auch Abschnitt 2.3): Während des schichtweisen Aufbaus von Bauteilen wird ein formloses bzw. -neutrales Ausgangsmaterial durch Einbringen von Energie zyklisch Schicht für Schicht verfestigt. Alle Schichtbauverfahren müssen bzgl. der Datenverarbeitung (CAD-

CAM Kopplung) drei Voraussetzungen erfüllen:

- Ausgangspunkt für die generative Fertigung eines Bauteils ist ein **3D-CAD-Modell**, in dem die kompletten Werkstückdaten digital abgebildet sind.
- Für den Bauprozess müssen die 3D-Volumenkörper mittels des sog. Slice-Prozesses digital in die **einzelnen Schichten zerlegt** und damit **auf zwei Dimensionen reduziert** werden. Diese 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.

Ein Vergleich mit konventionellen Fertigungsverfahren zeigt das wirtschaftliche und technische Potential der generativen 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

die wirtschaftliche Anwendbarkeit von Schichtbauverfahren. Zudem können einzelne hochkomplexe Bauteile z.B. mit innenliegenden Geometriefeatures ausschließlich mit generativen Fertigungsverfahren hergestellt werden.

Die schichtweise erzeugten Werkstücke können dabei sehr unterschiedliche Aufgaben in verschiedenen Einsatzgebieten erfüllen:

- Modelle:

- **Konzeptmodelle** dienen zur frühestmöglichen Visualisierung der Abmessungen und des allgemeinen Erscheinungsbildes einer Produktentwicklung.
- **Designmodelle** dienen zur form- und maßgenauen Darstellung des CAD-Modells. Es ist die Oberflächenqualität und Lage einzelner Elemente 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 (**Form-)Werkzeugen** können Endprodukte in einem nachfolgenden Fertigungsprozess (z.B. Spritzgießen) hergestellt werden.
  - Kundenindividuelle, endkonturnahe **Einzel- und Serienbauteile** können vollständig funktional eingesetzt werden.

Generative Fertigungsverfahren können demnach in allen Phasen der Produktentwicklung eingesetzt werden.

## 2.2 Definition

Alle Verfahren, mit deren Hilfe dreidimensionale Modelle, Prototypen und Bauteile additiv, also durch Aneinander- oder Aufeinanderfügen von mehreren Volumenelementen hergestellt werden, bezeichnet man als generative Fertigungsverfahren. In der Literatur und in der Praxis trifft man auf viele weitere Bezeichnungen, welche durch die im Jahr 2010 eingeführte VDI Richtlinie 3404 zusammengefasst und standardisiert werden.

Generative Fertigungsverfahren werden aus historischen Gründen gerne mit dem Namenszusatz „rapid“ versehen, um auszudrücken, dass die generativen Verfahren (bei kleinen und mittleren Stückzahlen) schneller als ihre klassischen Alternativen sind. Durch die Vermeidung des i.d.R. bei klassischen Verfahren notwendigen Werkzeugbaus bieten generative Verfahren neben Geschwindigkeitsvorteilen in den meisten Fällen auch hohe wirtschaftliche Einsparpotentiale. Zusammengefasst werden die generativen Fertigungsverfahren daher auch als **Rapid-Technologien** bezeichnet.

Wie oben erwähnt können die generativen Verfahren über den gesamten Produktentstehungsprozesses wirtschaftlich zum Einsatz kommen (*siehe Bild 2.1*). Rapid Technologien werden dabei in die Bereiche Rapid Prototyping, Rapid Tooling und Rapid Manufacturing eingeteilt.

Mit **Rapid Prototyping** wird ein Anwendungsbereich der Rapid-Technologien bezeichnet, in dem kostengünstig und schnell 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 Rapid-Prototyping-Bereich auf den Einsatz

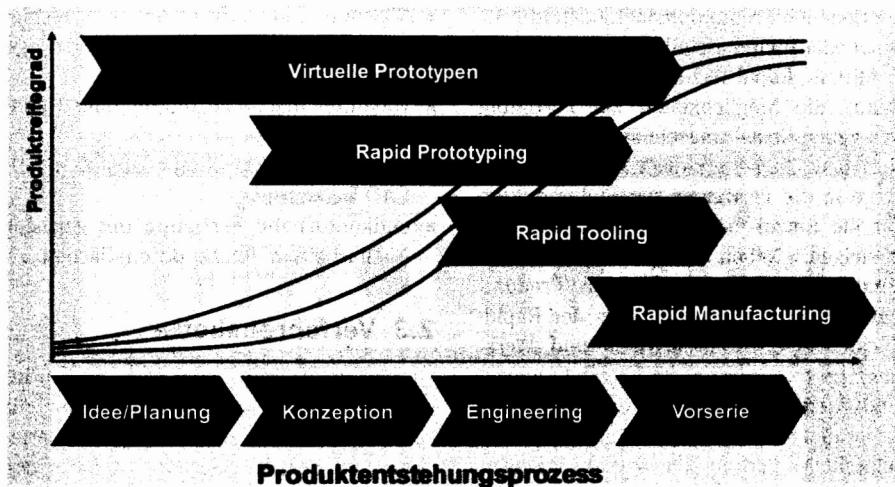


Bild 2.1: Rapid-Technologien im Produktentstehungsprozess

des meist teuren Serienmaterials verzichtet werden. Der Begriff **Rapid Prototyping** deckt damit nur einen kleinen Teil der generativen Anwendungen ab und sollte daher nicht gleichbedeutend mit dem Begriff generative Verfahren verwendet werden.

Unter **Rapid Tooling** versteht man, wenn unter Einsatz von generativen Verfahren Werkzeuge und Formen zur Herstellung von Prototypen, Vorserien- und Serienbauteilen produziert werden (z.B. Gieß-, Spritz- und Ziehformen). Dabei wird größtenteils das selektive Laserstrahlschmelzen eingesetzt, durch welches neben der schnellen Herstellung auch die Formgebungsfreiheiten der Rapid-Technologien effektiv genutzt werden können. Um die nötige Präzision bzw. die geforderten Oberflächeneigenschaften zu erreichen, werden häufig noch klassische Verfahren wie das HSC-Fräsen herangezogen um die generativ hergestellten Werkzeuge und Formen nachzuarbeiten. Man spricht in diesem Fall von *direktem* Rapid Tooling. Als

*indirektes* Rapid Tooling bezeichnet man die Herstellung von Werkzeugen durch Abformen von generativ hergestellten Urmodellen. Verfahren, bei denen die Werkzeuge z.B. durch CNC-Programmierung und anschließendem HSC-Fräsen aus dem vollen Rohmaterial innerhalb kurzer Zeit hergestellt werden können, werden neben den generativen Fertigungsverfahren mit zur Gruppe der Rapid-Technologien gerechnet. Auf Grund des Zerspanungscharakters dürfen diese jedoch nicht mit generativen Prozessen verwechselt werden.

Mit **Rapid Manufacturing** wird die generative Herstellung von Endprodukten für die Einzel- oder Serienfertigung bezeichnet. Die Bauteile werden aus den Konstruktionsdaten im Original-Werkstoff gefertigt und besitzen alle Merkmale des Endprodukts. Neben der Möglichkeit zur schnellen Bauteilherstellung werden durch den generativen Aufbau produktseitig konstruktive Gestaltungsmerkmale (z.B. oberflächennahe Kühlkanäle oder gekrümmte Bohrungen) ermöglicht, welche mit kon-

ventionellen Produktionsmethoden nur bedingt oder nicht herstellbar sind.

Mittels Rapid-Technologien gelingt es damit, 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 Rapid-Technologien im Prototypen- und Werkzeugbau bzw. zur direkten Herstellung von Endbauteilen erleichtert der Einsatz der generativen Fertigungsverfahren auch die logische Verkettung der Auftragsdatenverarbeitung. Nicht nur die Herstellungszeit selbst kann im Vergleich zu konventionellen Verfahren als schnell bezeichnet werden, durch die direkte CAD-CAM Kopplung wurde auch die Arbeitsvorbereitung z.B. für die Erzeugung und Konvertierung von Fertigungsdaten vereinfacht und beschleunigt.

Zu den zukunftssicheren Rapid-Technologien zählen im Metallbereich v.a. das Strahlschmelzen, auch bekannt unter Laser Forming, Selective Laser Melting (SLM), LaserCusing, Electron Beam Melting (EBM) oder Direktes-Metall-Lasersintern (DMLS) (*Bild 2.2*) sowie das Auftragschweißen (Direct Metal Deposition (DMD)). Diese eignen sich sowohl zur Prototypen-Erstellung, als auch zum Reparieren oder Ändern von Werkzeugen und Gussformen. DMD ermöglicht die Bearbeitung von Freiform-Flächen durch schichtweises Aufschmelzen von Metallpulver im Laserstrahl. Dabei ist der Wärmeeintrag ins Werkstück minimal. Beide oben genannten Verfahrensvarianten sind gekennzeichnet durch:

- Das Metallpulver als Ausgangswerkstoff,
- vollständiges Schmelzen des Metallpulvers durch den Laser,

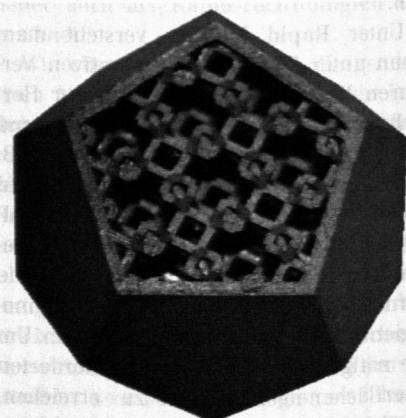
- Mischen und Auftragen von verschiedenen Metallpulvern auf andersartige Grundmaterialien,
- vollautomatische Fertigung, ohne Handarbeit,
- Teilegenerierung direkt aus den 3D-CAD-Daten und
- endkonturnahe Fertigung mit geringer Nacharbeit an den Funktionsflächen.

## 2.3 Verfahrenskette

Übergreifend über alle Verfahrensprinzipien in der generativen Fertigung gilt ein ähnliches Prinzip der Modellgenerierung und der Prozesskette, welches der unten dargestellte Verfahrensablauf zeigt (*Bild 2.3*). Der Prozess zur Erzeugung von generativen Bauteilen ist dabei in folgende Bereiche zu unterteilen.

### Bauprozessvorbereitung

Grundlage und Voraussetzung aller generativen Fertigungsprozesse ist ein voll-



*Bild 2.2: Mittels Strahlschmelzen hergestellter Dodekaeder mit innenliegender geometrisch komplexer Struktur aus Metall, ohne mechanische Nacharbeit*

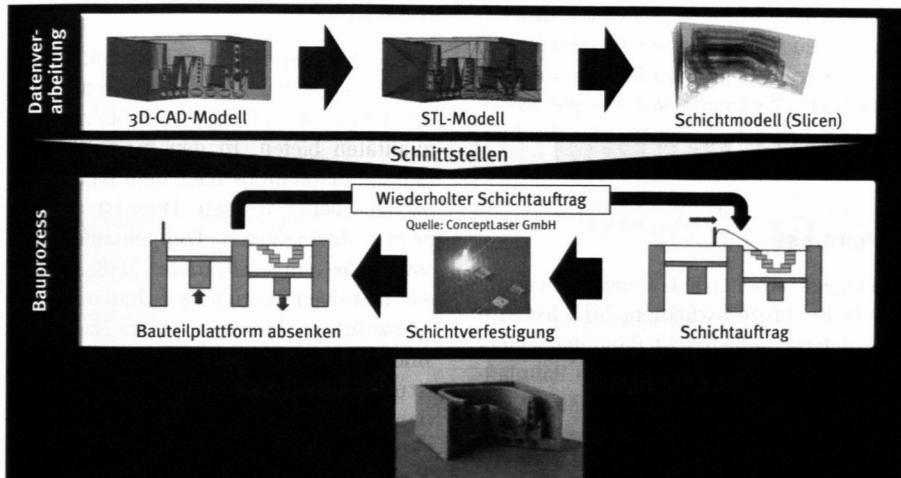


Bild 2.3: Ablauf der Datenverarbeitung sowie des Bauprozesses vom 3D-Volumenmodell bis zum fertigen Bauteil

ständiges, maßhaltiges, dreidimensionales CAD-Volumenmodell. Die Wahl des zu verwendenden CAD-Konstruktionsprogramms richtet sich dabei nach den Möglichkeiten zum Datei-Export. Zum Einsatz bei Rapid-Technologien kommen Formate wie STL, IGES oder STEP. Das hauptsächlich Verwendung findende STL-Format basiert auf der Annäherung der Geometrie durch Dreiecke (Triangulation). Dieses Format wird auch von allen gängigen CAD-Programmen unterstützt. Der Prozess der Triangulation umfasst dabei die möglichst genaue Annäherung der Geometrieaußenfläche durch Dreiecke. Diese Dreiecke werden durch die Lage der drei Eckpunkte und den zugehörigen Normalenvektor, der vom Volumen des Bauteils weg zeigt, definiert. Durch die Gesamtzahl der Dreiecke und Normalenvektoren bleibt die Oberflächeninformation erhalten. Eine Verifikation der Geometrie der Bauteile nach der Triangulation sollte dabei aber immer durchgeführt werden. Reparaturfunktionen bei Triangulationsfehlern stellt in der Regel jede

Software zur Datenvorbereitung zur Verfügung.

Der STL-Datensatz des Bauteils ist die Eingangsinformation für den Slice-Prozess. Dabei wird das Bauteil in einzelne Schichten zerlegt. Die Schichtdicke richtet sich nach dem zur Anwendung kommenden Verfahren bzw. der gewünschten Oberflächengüte. Beim Slicen wird somit für jede Schicht die Geometrieeinformatiion für den Bauvorgang erzeugt. An Rundungen, Freiformflächen und stumpfen Winkeln wird durch den schichtweisen Aufbau ein Stufeneffekt erzeugt. Dies führt zu einer geringen Oberflächenqualität. Je größer die Schichtdicke ist, desto größer wird dieser Stufeneffekt. Im Gegensatz dazu verringern sich mit größerer Schichtdicke die Bauzeit und somit die Bauteilkosten. Für jeden Bauprozess gilt es einen Kompromiss zu finden.

In einem letzten Schritt in der Bauprozessvorbereitung ist das Bauteil im Raum der Maschine virtuell mittels der Anlagensoftware zu platzieren. Gleichzeitig

werden die einzelnen Schichtinformationen in Steuerdaten der Anlage transferiert. Der Anwender legt anschließend anlagen-spezifische Parameter, wie beispielsweise die Verfahrgeschwindigkeit oder die Bau-raumtemperatur, fest.

### Bauprozess

Prinzipiell arbeitet jedes additive Verfahren in drei Prozessschritten. Zunächst wird das Material aufgebracht, dann die Schicht verfestigt und abschließend die Bauplattform zum Aufbringen der nächsten Schicht abgesenkt. Das Aufbringen des Materials und der Verbindungsprozess variieren dagegen je nach Anlage und Fertigungstechnologie. Zudem unterscheiden sich die Materialien hinsichtlich ihres Ausgangszustands in pulverförmige, flüssige und feste Werkstoffe. Die Verfestigung des Ausgangsmaterials erfolgt dabei mit Hilfe einer Energiequelle oder durch Auftragen eines chemischen Aktivators. Nachdem die erste Schicht aus der Bauprozessvorbereitung verfestigt wurde, wird die Bauplattform um eine Schichtdicke abgesenkt und eine neue Schicht des Ausgangsmaterials aufgebracht. Dies geschieht in der Regel mit einem flächigen Auftragsmechanismus, wie beispielsweise einer Walze oder einem Wischer, der eine möglichst homogene Ausgangsschicht herstellt. Es folgt die Verfestigung der neuen Schicht nach den Vorgabedaten aus der Bauprozessvorbereitung. Parallel hierzu wird eine Verbindung mit der darunter liegenden Schicht hergestellt. Bei den additiven Verfahren führt diese Vorgehensweise zu anisotropem Materialverhalten, da die Verbindung des Ausgangsmaterials in der x-/y-Ebene normalerweise höher ist als in z-Richtung.

### Nacharbeit

Auch über die Stufenproblematik hinaus können viele generative Verfahren derzeit nur vergleichsweise geringe Oberflächenqualitäten bieten. In den meisten Fällen müssen die Bauteile nach dem Bauprozess nachgearbeitet werden. Dies ist auf den prozessabhängigen Treppenstufeneffekt sowie die eingeschränkte Maßhaltigkeit der additiven Fertigungstechnologien zurückzuführen. Für eine spätere Nacharbeit sind beispielsweise Fixpunkte bei der Konstruktion als Referenzpunkte vorzusehen. Damit ist es möglich, ein Hilfskoordinatensystem aufzustellen, auf das die Nachbearbeitung beispielsweise mittels eines CNC-Bearbeitungszentrums aufbaut. Der Konstrukteur sollte diese Fixpunkte so wählen, dass diese durch die generativen Verfahren auch maßgenau gefertigt werden können. Darüber hinaus kann über thermische Nachbehandlungsprozesse das anisotrope Materialverhalten reduziert bzw. eliminiert werden.

## 2.4 Einteilung der generativen Fertigungsverfahren

Die heute bekannten generativen Fertigungsverfahren können nach den beiden Gesichtspunkten Ausgangsmaterial und Formgebung eingeteilt werden:

### Einteilung nach dem Ausgangsmaterial

Entsprechend Bild 2.4 werden heute drei Arten von Ausgangsmaterial verwendet:

- Pulverförmige Granulate
- Flüssige Kunsthärze
- Feste Ausgangsstoffe

Bei Verfahren, die **pulverartiges oder körniges** Ausgangsmaterial verwenden, kommen Sinter- oder Klebeverfahren zum Ein-

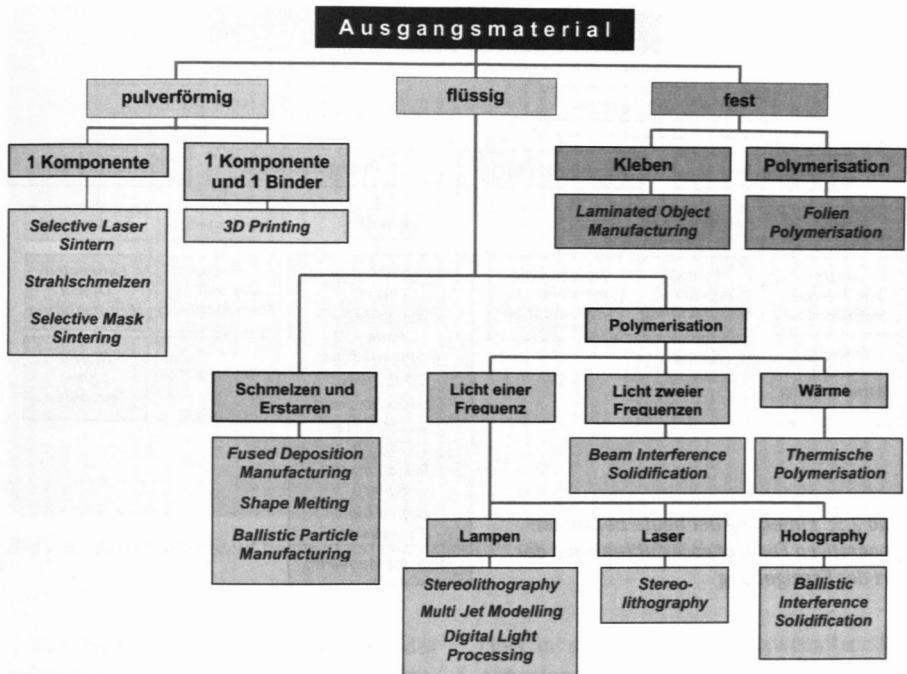


Bild 2.4: Einteilung der heute bekannten generativen Fertigungsverfahren nach dem Ausgangsmaterial

satz. Hierbei wird durch gezielte Bestrahlung mit Laser das in dünnen Schichten „aufgelegte“ oder zugeführte Material aufeinander geschmolzen und verfestigt. Beim 3D-Printing erfolgt die Verfestigung durch gezielt eingebrachten Binder, z.B. Wasser in Gips.

Bei Verwendung **flüssiger** Stoffe werden vorwiegend Kunstharze durch Laserlicht oder Wärme (UV-Strahlen) gezielt verfestigt (polymerisiert) und mit den früheren, darunter liegenden Schichten verbunden. Zu diesem Verfahren zählt aber auch die Verwendung von festen Ausgangsstoffen (Kunststoffen), die durch Schmelzen und anschließendes schnelles Abkühlen auf dem bestehenden Modell dieses schichtweise aufbauen. Dabei wird der zähflüssige

Kunststoff schichtweise aufeinander gespritzt.

Werden **feste**, formneutrale Ausgangsstoffe benutzt, so sind dies im Wesentlichen Lagen aus Folie oder Papier, die schichtweise aufeinander geklebt und konzentriert (mit Laser oder Messer) ausgeschnitten werden. Dabei kommen sowohl konventionelle Klebeprozesse, als auch Teil-Polymerisation (Verkleben durch Erwärmen) zum Einsatz.

### Einteilung nach der Art der Formgebung

Hier unterscheidet man Verfahren, die in der Lage sind, dreidimensionale Formen direkt zu erstellen und andere, die durch

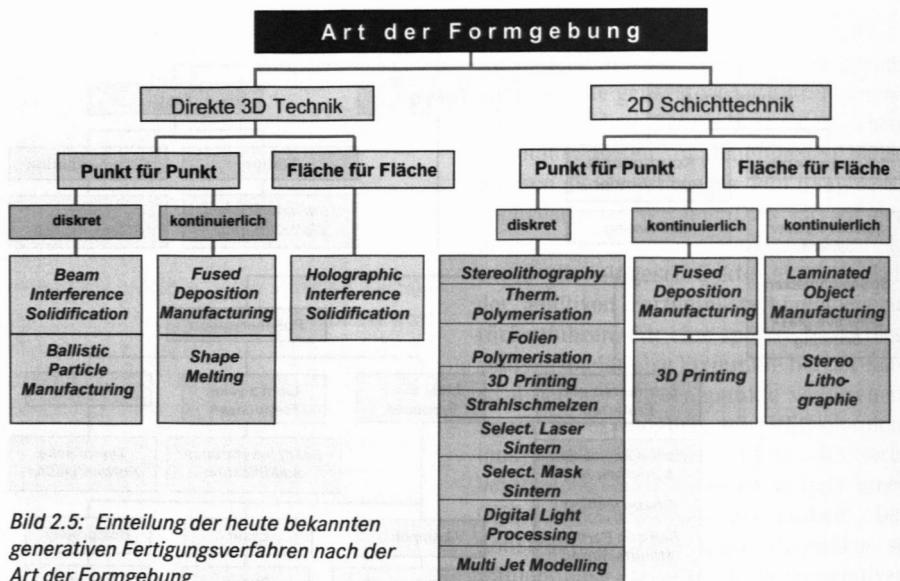


Bild 2.5: Einteilung der heute bekannten generativen Fertigungsverfahren nach der Art der Formgebung

Aufeinanderschichten von zweidimensionalen Einzelschichten die Endform erzeugen. Bild 2.5 gibt einen Überblick über die einzelnen Verfahren.

Alle heutigen Verfahren arbeiten zweidimensional, d.h. wiederum mit einzelnen Schichten. Dabei werden Schicht-für-Schicht-Modelle aufgebaut und so die dritte Dimension erzeugt. Das gilt auch für solche Verfahren, die eigentlich prinzipiell in der Lage wären, gleich dreidimensional zu arbeiten (z.B. Fused Deposition Manufacturing). Die Begründung ist, dass die dafür erforderliche 3D-Software deutlich komplizierter und deshalb zurzeit auch nicht verfügbar ist.

## 2.5 Die wichtigsten Schichtbauverfahren

### 2.5.1 Strahlschmelzen

#### Verfahrensbeschreibung

Bei generativen Fertigungsverfahren nach dem Prinzip des Strahlschmelzens liegt das Ausgangsmaterial in einem pulverförmigen Zustand vor. Durch einen Auftragsmechanismus (z.B. einer Rakel) wird zu Beginn des Prozesses eine Pulverschicht auf eine Bauplattform aufgebracht. Diese Schicht wird, an Stellen an denen später das Bauteil entstehen soll, je nach Verfahrensprinzip durch einen Elektronen- oder einen Laserstrahl aufgeschmolzen und somit auf der Bauplattform verfestigt. Durch ein wiederholendes Absenken der Bauplattform, Auftragen einer neuen Schicht sowie Verschmelzen des Bauteilvolumens entsteht so Schicht für Schicht das Bauteil (siehe Bild 2.6).

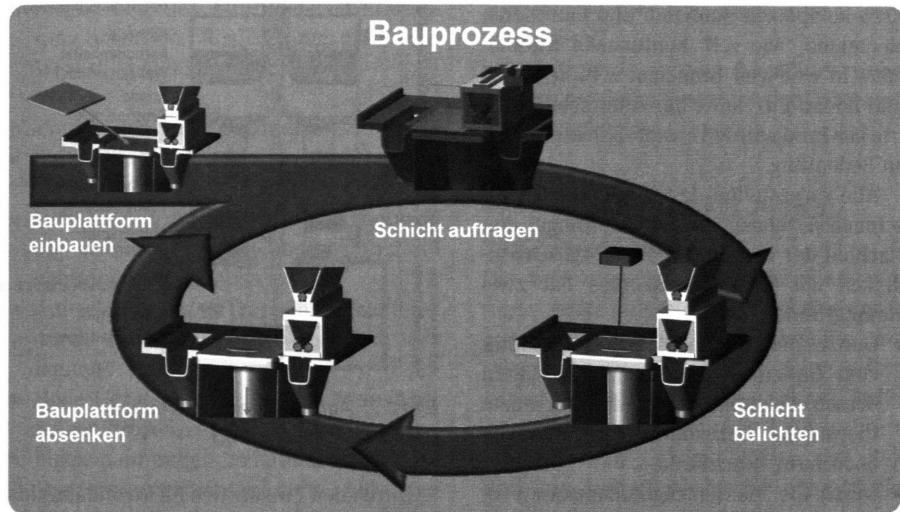


Bild 2.6: Verfahrensablauf bei direkten und indirekten Strahlschmelzverfahren

Die beim lokalen Aufschmelzen des pulverförmigen Ausgangsmaterials auftretenden Effekte sind durch vollständiges Überführen des Ausgangsmaterials in den schmelzflüssigen Zustand charakterisiert und unterscheiden sich dadurch von den Sinterprozessen.

Anstelle eines zweistufigen Sinterverfahrens (vgl. Beispiel *Lasersintern*) hat sich im industriellen Umfeld ein einstufiger Strahlschmelzprozess etabliert. Für diesen Prozess existieren unterschiedliche Bezeichnungen. Während die Firma EOS das „Direkte-Metall-Lasersintern“ (DMLS) verwendet, bevorzugen andere Firmen die Bezeichnungen LaserCusing (Concept Laser) oder „Selective Laser Melting“ (SLM) (MTT Technologies). Der Verfahrensablauf ist jedoch bei allen Herstellern ähnlich: Der Ausgangswerkstoff ist immer ein einkomponentiges Metallpulver, welches während des Bauprozesses vollkommen aufgeschmolzen wird. Dadurch kann ein nahezu porenfreies Bauteil erzeugt werden, wel-

ches in seinen Materialeigenschaften denen eines konventionell gefertigten (z.B. gegossenen) Bauteils desselben Materials ähnlich ist. Eine thermische Nachbehandlung wie beim IMLS-Verfahren (vgl. Beispiel *Lasersintern*) ist nicht notwendig. Derzeit sind als pulverförmiges Ausgangsmaterial unterschiedliche Werkzeug- und Edelstähle, Aluminium- und Nickelbasislegierungen, Titan in Reinform und in verschiedenen Legierungszusammensetzungen sowie Gold verfügbar und verarbeitbar. Die Materialpalette wird stetig in zahlreichen Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten erweitert.

Gerade im Bereich des Prototypenbaus und der Kleinserienfertigung können durch die einstufigen Verfahren einsatzfähige Bauteile für unterschiedliche Anwendungen hergestellt werden. Besonders in der Medizintechnik sowie im Werkzeug- und Formenbau gelten diese Technologien als wichtige wirtschaftliche Fertigungsalternative zur Herstellung von geomet-

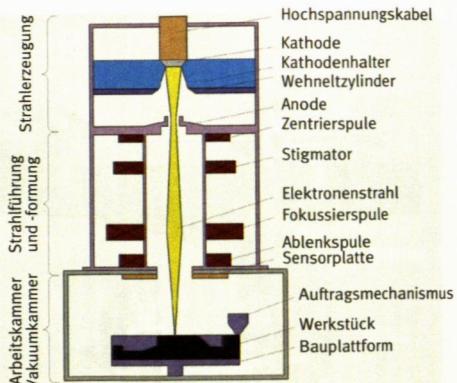
risch komplexen Bauteilen und Funktions-elementen, wie z.B. konturnahe Kühl-kanäle. In weiteren Branchen z.B. der Luft- und Raumfahrt sowie der Automobilindus-trie gewinnen diese Verfahren derzeit stark an Bedeutung.

Alle vorgestellten laserbasierten Strahl-schmelzverfahren haben allerdings den Nachteil der begrenzten Verfahrgeschwin-digkeit des Laserstrahls. Dies hat zwei Hauptgründe:

- Durch die mechanische Spiegeloptik zum Umlenken des Laserstrahls wird dessen Leistung durch die begrenzte thermische Belastbarkeit der Spiegel-anordnung beschränkt.
- Durch die Massenträgheitsmomente in der Spiegeloptik wird die Verfahrgeschwindigkeit des Laserstrahls limitiert, da bei zunehmender Ablenkgeschwin-digkeit die Genauigkeit der Verfahrwege beeinträchtigt wird.

Verwendet man statt eines Laserstrahls einen Elektronenstrahl im „Electron Beam Melting (EBM)“-Prozess kann dieser Nachteil behoben und somit die Prozess-geschwindigkeit erhöht werden (*siehe Bild 2.7*).

Für die Strahlerzeugung wird bei dieser Form der Bearbeitung eine sog. Elektronen-strahlkanone verwendet, in welcher der Strahlstrom, d.h. die Leistung des Elektronenstrahls gezielt gesteuert werden kann. Im Bereich der Strahlführung und -for-mung wird der erzeugte Elektronenstrahl durch elektromagnetische Linsen zu ei-nem Strahl mit einem kreisförmigen Quer-schnitt geformt, im Brennpunkt fokussiert und in der Ebene abgelenkt. Der Arbeits-bereich befindet sich in einer Vakuum-kammer, welche ein Streuen des Elektronenstrahls verhindert. Dort sind der Pulvervorratsbehälter, der Auftragsmecha-nismus sowie die Bauplattform angeordnet.



**Bild 2.7: Aufbau einer EBM-Anlage (Electron Beam Melting)**

Durch den Einsatz des Elektronenstrahls lässt sich aufgrund der größeren Ablen-gegeschwindigkeiten und der höheren Leis-tungs-dichte eine höhere Prozessgeschwin-digkeit erzielen. Durch die hohe Ablen-gegeschwindigkeit ergeben sich zudem Potentiale für eine verbesserte Prozess-führung, wie z.B. eine quasiparallele Be-lichtung sowie eine frei konfigurierbare Strahlformung zur gezielten Beeinflussung und Optimierung des Wärmeeintrags in das Bauteil. Wegen der genannten Vorteile wird derzeit das EBM-Verfahren detailliert untersucht und weiterentwickelt, um zu-künftig eine größere Durchdringung in der industriellen Anwendung zu erreichen.

#### Vorteile des Strahlschmelzens:

- Hohe geometrische Formgebungs-freiheit
- Dünne Wandstärken realisierbar
- Einsatzfähige Funktionsbauteile herstellbar
- Verwirklichung innenliegender, kontur-nahe Kühlkanäle möglich
- Verarbeitung von Werkstoffen, welche aufgrund ihrer thermischen und me-chanischen Materialeigenschaften durch konventionelle Verfahren nicht oder nur schwer zu verarbeiten wären

- Möglichkeit der Multimaterialverarbeitung sowie der Realisierung grader Werkstoffeigenschaften

#### Nachteile des Strahlschmelzens:

- Stützkonstruktionen an Bauteilüberhängen notwendig
- Verwendung einer Bauplattform notwendig, welche in der Nachbearbeitung abgetrennt werden muss
- Auftreten des Treppenstufeneffekts durch den schichtweisen Aufbau des Bauteils
- Hohe Herstellkosten für ein Bauteil bei langen Prozesszeiten
- Eigenspannungen im Bauteil durch hohe Temperaturgradienten beim Abkühlen des aufgeschmolzenen Pulvers
- Teilweise rau e Oberflächen und damit verbundene Nachbearbeitung bei Funktionsflächen
- Begrenzte Bauraum- und somit Bauteil-

größe (derzeit maximal  $300 \times 350 \times 300 \text{ mm}^3$ )

- Schutzgasatmosphäre beziehungsweise Vakuum (beim Elektronenstrahlschmelzen) notwendig

#### 2.5.2 Lasersintern (LS) (Bild 2.8)

##### Verfahrensbeschreibung

Der Verfestigungsprozess kristalliner, körniger oder pulverförmiger Stoffe durch Zusammenwachsen der Kristallite bei entsprechender Erwärmung wird definiionsgemäß als Sintern bezeichnet. Dafür wird das Pulverbett zum Teil auf mehrere hundert Grad Celsius erhitzt. Der Prozess kann sowohl für Metalle als auch für Kunststoffe verwendet werden.

Für Metalle wird in einem zweistufigen Prozess mittels des Indirekten-Metall-Lasersintern (IMLS) ein im Metallpulver enthaltener Kunststoffbinder aufgeschmolzen.

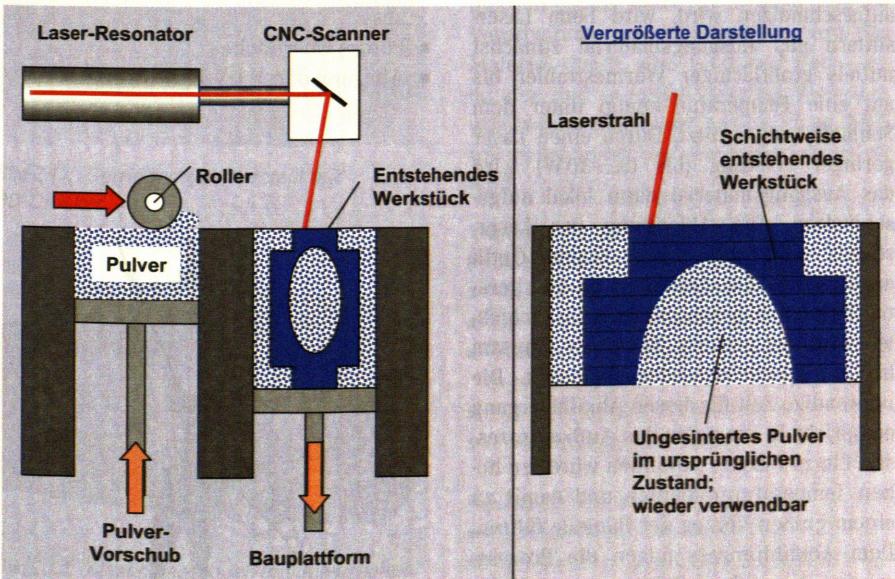


Bild 2.8: Lasersintern (LS), Funktionsprinzip

zen, welcher die Metallpartikel umgibt. Dadurch entsteht zunächst ein sogenannter „Grünling“ mit geringer Festigkeit. Um daraus ein adäquates Metallbauteil zu generieren, ist eine nachgelagerte Wärmebehandlung notwendig, in welcher der Kunststoffbinder ausgetrieben wird und sogenannte Sinterhälse zwischen den Metallpartikeln entstehen. Zeitgleich wird in das Bauteil Bronze infiltriert, sodass ein stabiles Gefüge entsteht, welches zu ca. 60% aus Stahl und 40% aus Bronze zusammengesetzt ist.

Das Lasersintern (LS) ist ebenfalls bekannt unter der Bezeichnung Selektives Lasersintern (SLS). Das pulverbettbasierte Verfahren ermöglicht die Herstellung von Prototypen und Funktionsbauteilen aus Kunststoffen innerhalb von wenigen Stunden (*Bild 2.9*). Als Materialien werden hierbei überwiegend Polyamid und Polystyrol verarbeitet. Im Gegensatz zu den Strahlschmelzverfahren, bei welchen das Ausgangsmaterial alleinig durch den Strahl aufgeschmolzen wird, wird beim Lasersintern das Ausgangsmaterial zunächst mittels großflächiger Wärmestrahlung bis auf eine Temperatur knapp unter dem Schmelzpunkt erhitzt. Durch einen Laser geringer Leistung (bis ca. 30 W) wird das Ausgangsmaterial dann lokal aufgeschmolzen. Die Ablenkung des Laserstrahls wird von einer Scanner-Optik durchgeführt. Im Anschluss an das iterative Herstellen der einzelnen Bauteilschichten wird der gesamte Bauträger langsam bis auf Raumtemperatur abgekühlt. Die notwendige Zeit für diesen Abkühlvorgang entspricht in etwa der des Aufbauprozesses. Ein zu rasches Abkühlen würde zu hohen Temperaturgradienten und damit zu einem großen Verzug der Bauteile führen. Dem Abkühlprozess folgen die Prozessschritte Auspacken, Reinigung und Nachbehandlung der Bauteile. Die gesinterten

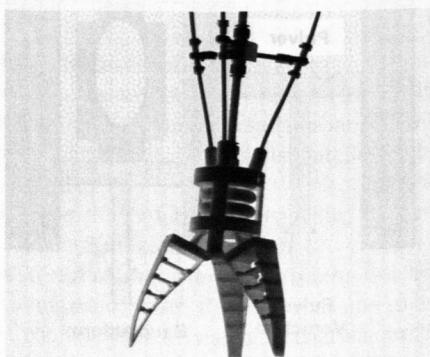
Bauteile sind im nicht verfestigten Pulver eingebettet und können hieraus entnommen werden. Mittels Druckluft werden die Bauteile anschließend gereinigt und restliche Pulveranhäufungen entfernt. Das nicht verfestigte Ausgangsmaterial kann wieder verwendet werden. Für optimale Prozessergebnisse sollte ein Mischungsverhältnis von Alt- und Neupulver von ca. 1:1 verwendet werden.

### Vorteile des Lasersinterns

- Kurze Durchlaufzeit im Vergleich zu Strahlschmelzverfahren
- Herstellung komplexer, funktionsintegrierter Bauteile möglich
- Einsatzfähige Funktionsbauteile mit komplexen Geometrien fertigbar
- Große Materialvielfalt
- Kein Support notwendig

### Nachteile des Lasersinterns

- Schwund und Verzug bei großen Bauteilen durch den thermischen Bauprozess
- Poröse Oberfläche
- Alterung durch UV-Einwirkung



*Bild 2.9: Generativ gefertigter Greifer [Festo]*



Bild 2.10: 3D-Drucker [voxeljet]

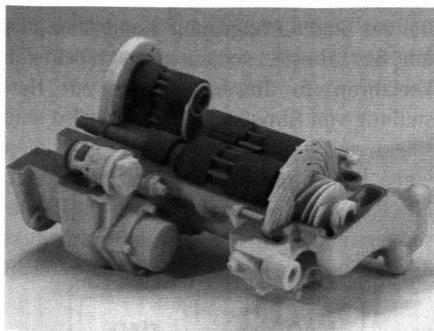


Bild 2.11: Getriebemodell erstellt mit 3D-Drucker

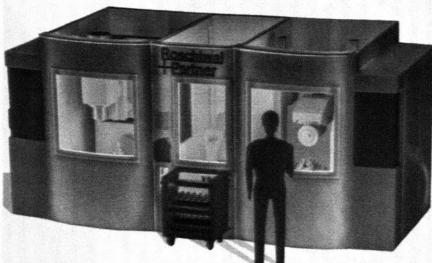


Bild 2.12: Maschinenmodell mit beweglichen Baugruppen, erstellt mit 3D-Drucker  
(Quelle: Roschiwal+Partner)

### 2.5.3 3D-Drucken (3DP)

(Bild 2.10 bis 2.12)

#### Verfahrensbeschreibung

Das 3D-Drucken (3DP, 3D Printing) ist ein generatives Verfahren, bei welchem gezielt flüssiger Binder mit Hilfe 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, von Kunststoffen über Keramiken und Sand (für Gussformen) bis hin zu Metallen verarbeitbar. Durch die Verwendung eines im Vergleich zum Lasersystem kostengünstigen Druckkopfes entstehen erhebliche Kostenvorteile gegenüber dem Lasersintern. Für Kunststoffbauteile werden die Modelle nach dem Bau durch Infiltration (beispielsweise mit Epoxyharz oder Wachs) nachbehandelt, um die mechanischen Eigenschaften zu erhöhen. Bei der Verarbeitung von Metallpulver wird das Material durch eine Bindersubstanz verbunden und zu einem Grüning verfestigt, welcher anschließend analog zum IMLS wärmebehandelt und mit Bronze infiltriert wird.

#### Vorteile des 3D-Druckens

- Hohe Baugeschwindigkeit
- Viele Werkstoffe verarbeitbar
- Große Bauräume möglich
- Beträchtliche Anzahl an Anlagenherstellern (Bild 2.10)
- Farbige Bauteile herstellbar
- Preisgünstiges Verfahren

#### Nachteile des 3D-Druckens

- Geringe Oberflächenqualität
- Mittelmäßige mechanische Eigenschaften wegen geringer Dichte

### 2.5.4 Fused Deposition Modeling (FDM)

#### Verfahrensbeschreibung

Die Extrusionsverfahren sind dadurch gekennzeichnet, dass eine oder mehrere Düsen flüssiges oder aufgeweichtes Material auf eine Bauplattform aufbringen. Durch das anschließende Erkalten erhält das Bauteil seine Festigkeit. Das Fused Deposition Modeling (FDM), auch als Fused Layer Modeling (FLM) bekannt, ist dabei das relevanteste, mit nur einem Werkstoff arbeitende Verfahren. Eine Untergruppe stellt dabei das Multi-, beziehungsweise Poly-Jet Modeling dar, bei dem Bauteile mit graduierten Eigenschaften hergestellt werden können. Die Düse besitzt dabei im Normalfall zwei Freiheitsgrade (in x- und y-Richtung), während die gesamte Bauplattform in z-Richtung verfahren werden kann. Auf diese Weise werden dreidimensional Bauteile erstellt. Der Stoffschluss zwischen den Extrusionsraupen ergibt sich beim Erkaltungsprozess. Durch den Aufbau in Strängen ergibt sich eine relativ schlechte Oberflächenqualität, wie in Bild 2.13 dargestellt.

#### Vorteile des Fused Deposition Modeling (Bild 2.13 und 2.14)

- Gute mechanische Eigenschaften
- Geringe Anlagengröße
- Möglichkeit zu Bürosystemen
- ABS ist zu verarbeiten

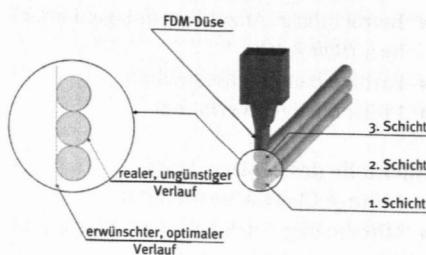


Bild 2.13: Bauteilqualität mittels FDM

- Durch Mehr-Düsen-Systeme ist eine leichte Umsetzbarkeit von Multimaterial-Bauteilen möglich
- Hohe Anzahl an Anlagenhersteller
- Selbstbau-Systeme verfügbar

#### Nachteile des Fused Deposition Modeling

- Geringe Oberflächenqualität
- Schwer zu realisierende Überhänge, da kein unterstützendes Material vorhanden ist
- Aufwändige Entfernung der Supports notwendig

### 2.5.5 Stereolithographie (STL) (Bild 2.15)

#### Verfahrensbeschreibung

Bei der Stereolithographie handelt es sich um das älteste, schichtweise arbeitende Verfahren. In diesem Prozess zur Herstellung von Kunststoffbauteilen wird eine selektive dreidimensionale Polymerisation eines lichtempfindlichen Harzes genutzt. Zur Polymerisation wird meist ein UV-Laser verwendet, mit dem nur im Brennpunkt des Lasers die kritische Energie erreicht

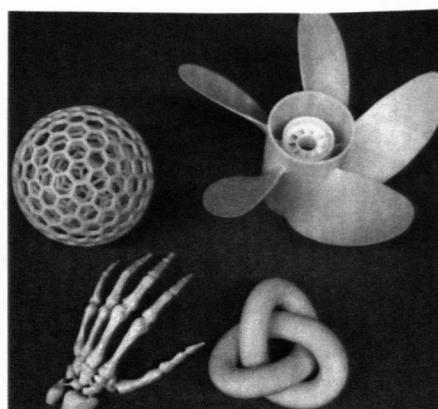


Bild 2.14: Verschiedene Bauteile - erstellt mit FDM

wird, um das Bauteil zu verfestigen. Durch Absenken der Bauplattform legt sich neues, flüssiges Harz über die bereits gehärtete Schicht. Somit kann durch wiederholtes Absenken und Aushärten ein Bauteil dreidimensional hergestellt werden.

Unter dem genutzten Verfahrensprinzip der Polymerisation versteht man eine Kettenreaktion, bei der ungesättigte Moleküle zu Makromolekülen verknüpft werden. Dies lässt sich in die vier Schritte

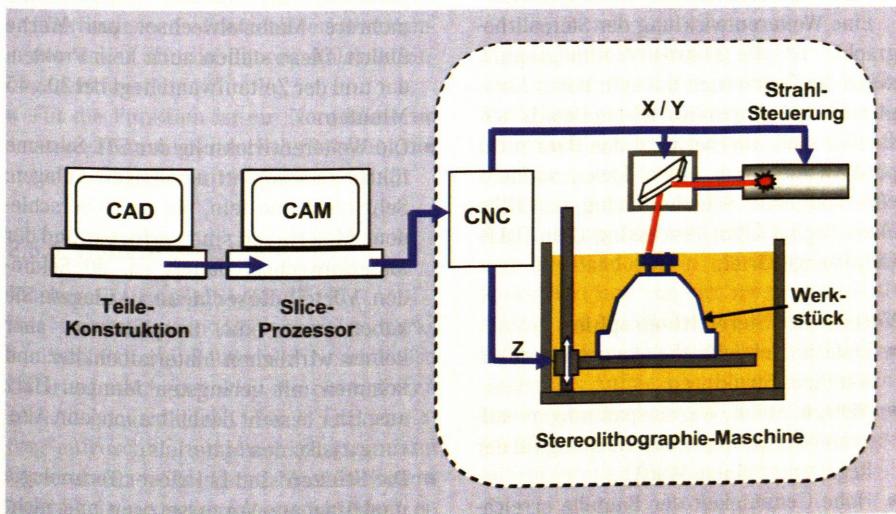
- Kettenstart oder Primärreaktion,
- Wachstumsreaktion,
- Kettenabbruch (Termination) und
- Kettenübertragung (Verzweigung einer Molekülkette)

unterteilen. Die bei der Stereolithographie eingesetzten Materialien müssen dabei auf UV-Strahlung reagieren und sehr schnell

zu einem Kettenabbruch kommen, damit nur die belichteten Bereiche des Harzes aushärten. Um die endgültige Bauteilfestigkeit zu erreichen, wird dem eigentlichen Bauprozess oft ein Aushärtevorgang in einem UV-Schrank nachgeschaltet.

Stereolithographiebauteile werden vor allem als Konzept- oder Funktionsmodelle im Produktentstehungsprozess verwendet. Ein weiteres Einsatzgebiet des Verfahrens ist die Herstellung von Urmodellen für den Vakuum- und Feinguss.

Die Stereolithographietechnik wird vom Marktführer 3D-Systems ständig weiterentwickelt und von allen namhaften Rapid Prototyping Dienstleistern angewendet. Wenn es sich um High-End-Prototypen und Urmodelle für den Vakuumguss handelt, führt kein Weg an der STL-Technik vorbei.



*Bild 2.15: Prinzip der generativen Fertigungssysteme. Die mittels CAD erstellten Werkstückdaten werden in einem Slice-Verfahren in viele, einheitlich dicke Schichten zerlegt und - je nach Verfahren - das Werkstück damit schichtweise aufgebaut. Bei der **Stereolithographie** entsteht das Werkstück auf einer Plattform von unten nach oben (Z-Achse). Schicht für Schicht wird durch Belichtung mit einem UV-/Laserstrahl (X-/Y-Achse) und Verfestigung des flüssigen Monomers aufeinander gesetzt und miteinander verbunden.*

STL ist der 3D-Drucktechnik bei vielen Geometrien bei Weitem überlegen, da bei der STL-Technik nur ca. 3 - 5 % des Bauteilgewichtes an Stützen benötigt wird. Da bei der 3D-Drucktechnik (z. B. Objet) immer alles was senkrecht nach unten geht zu 100% unterstützt wird, können die Stützen auch bis zum 10 oder 20-fachen des Bauteilgewichtes ausmachen. Ein Waste-Behälter, in welchen mindestens 200 Gramm Material bei einem Baustart zur Druckkopf- und Düsenreinigung gespült werden, ist bei der STL-Technik nicht erforderlich. Dies ist bei Materialkosten von rund 220 Euro je Kilogramm nicht unerheblich.

Aktuell gibt es auch eine STL-Anlage mit einem Laserfocus von lediglich 0,017 mm und einer möglichen Schichtstärke von 0,01 mm. Damit sind auch Teile für den Microbereich herstellbar. Gegenüber den 3D-Drucktechniken ist die Materialvielfalt für das STL-Verfahren um vieles größer.

Eine Weiterentwicklung der Stereolithographie ist die Mikrostereolithographie, durch die Geometrien mit sehr hoher Komplexität und gleichzeitig feinen Details herstellbar sind. Hierbei wird das Harz nicht punktweise durch einen Laser, sondern eine komplette Schicht flächig mit Hilfe eines Digital Light Processing Chip (DLP-Chip) ausgehärtet.

### Vorteile der Stereolithographie

- Einfache Herstellbarkeit komplexer, dünnwandiger Strukturen
- Nahezu keine Wärmespuren aufgrund der geringen Laserleistung (in der Regel unter einem Watt)
- Hohe Genauigkeit der Bauteile erreichbar

### Strittige Nachteile der STL:

- Die Alterung des Materials ist nur bei sehr geringem Teiledurchsatz, und längerem Stillstand ein Problem. In diesem

Fall findet keine „Auffrischung“ mit Neumaterial statt und es kann zu einer vorzeitigen Alterung kommen. Bei ständigem Durchsatz bleibt das Material der Grundfüllung in der Anlage und wird immer nur aufgefüllt. Bei großen Anlagen fasst der Behälter bis 480 kg – ein Materialkippen wäre hier fatal.

- Der **UV-Anteil des Tageslichts** ist kein Problem, da die Anlagenscheiben mit einer UV-Folie versehen sind. Direkte Sonneneinstrahlung darf das Material nicht bekommen.
- **Harzwechsel** ist bei den großen Anlagen problematisch und wird nicht gemacht! Die Kosten für eine Materialfüllung betragen ca. 85 000 € plus Wechselbehälter mit zusätzlichen ca. 50 000 €. Das Risiko eines kompletten Wechsels besteht bei zu geringem Materialdurchsatz wegen der Alterung des Materials. Bei kleinen Anlagen sind mehrere Materialwechsel pro Woche üblich. Diese stellen auch kein Problem dar und der Zeitaufwand liegt bei 30 - 45 Minuten.
- Die Weiterentwicklung der STL-Systeme führte zu komplett neuartigen Anlagen: Sehr klein und fein, bis zu 20 verschiedene Materialien sind verfügbar und der Materialwechsel dauert ca. 60 Sekunden. **Vorteil dieser neuen Anlagen:** Sie haben zwar eine Bauplattform, aber keinen wirklichen Materialbehälter und kommen mit geringsten Mengen Harz aus. Hier besteht deshalb auch kein Alterungsrisiko des Materials.
- Die **Stützen** sind bei dieser Technologie unabdingbare Voraussetzung und nicht wirklich ein Nachteil. Mit Software wie *Materialise E-Stage* (Stützengenerator) werden die Stützen nach der Positionierung der Teile im Handumdrehen automatisch generiert (*Bild 2.16*).

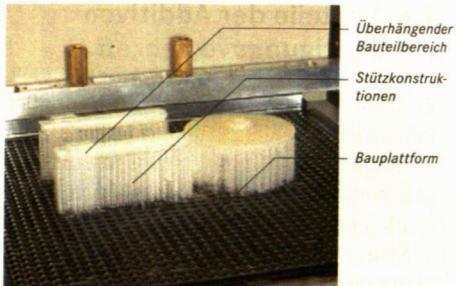


Bild 2.16: Durch Stereolithographie hergestelltes Bauteil mit Stützkonstruktionen

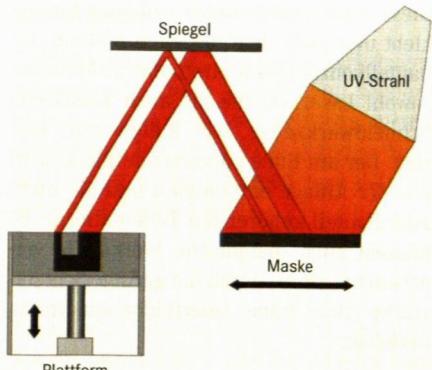


Bild 2.17: Prinzip des Masken-Sintern [Sintermask]

#### Wirkliche Nachteile der Technologie:

- Sehr hohe Kosten für die erforderlichen Wartungsverträge
- Hohe Anschaffungskosten, da kaum Mitbewerber zu 3D-Systemen bekannt sind
- 3D-Systems schützt das System mit einer Chipcodierung für die Material-Nachfüllbehälter. Am Markt angebotene und funktionierende Fremdmaterialien können daher nur auf älteren Anlagen eingesetzt werden.
- Für die Funktion ist ein Normklima im Anlagenraum erforderlich (Regelung der Luftfeuchtigkeit und Klimatisierung).

#### 2.5.6 Weitere Verfahren

##### Masken-Sintern (MS) (Bild 2.17)

Das Masken-Sintern (MS) weist eine starke Ähnlichkeit zum Selektiven Lasersintern (SLS) auf. Auch hier wird ein pulverbörmiges Ausgangsmaterial durch Energieeintrag aufgeschmolzen. Im Gegensatz zum Lasersintern wird beim Masken-Sintern jedoch kein einzelner Laserstrahl durch einen Scanner abgelenkt, sondern die Belichtung einer Schicht erfolgt großflächig über eine Maske. Die Maske wird schichtabhängig so bedruckt, dass an den zu verfestigenden Stellen die von einem UV-Strahler ausgesandte Energie auf das Pulverbett re-

flektiert wird. Die Maske besteht aus einem Spiegel, welche schichtabhängig mit Keramikpulver bedruckt wird. Durch das großformatige Belichten einer kompletten Fläche sinkt die Bauzeit pro Schicht stark ab.

##### Digital Light Processing (DLP)

Das Digital Light Processing folgt einem ähnlichen Verfahrensablauf wie die Stereolithographie, allerdings kann mit Hilfe eines speziellen Chips eine ganze Schicht zeitgleich belichtet und verfestigt werden. Zur Ansteuerung des DLP-Projektors werden die Baudaten in ein Bitmap-Format konvertiert und von der Spiegeleinheit als Maske auf die Bauebene projiziert. Wie bei der klassischen Stereolithographie sind wegen des Aufbaus im Fluid Stützstrukturen notwendig. Im Speziellen findet dieses Verfahren in der generativen Fertigung von Mikrobauteilen Verwendung.

##### Laminated Object Manufacturing (LOM)

Beim Laminated Object Manufacturing (LOM), auch Laminated Layer Manufacturing (LLM) genannt, liegt das Ausgangsmaterial plattenförmig vor, beispielsweise in Form von Kunststofffolien oder Papier.

Diese wird schichtweise aufeinander geklebt und nach dem Auflegen entlang der Bauteilkontur geschnitten. Hierzu kommen sowohl Lasersysteme als auch klassische Schneidwerkzeuge, wie Rollen zum Einsatz. Der am Ende entstehende Block wird aus der Anlage entnommen und die nicht zum Bauteil gehörenden Teile entfernt. Es können auch metallische Werkstoffe verarbeitet werden. Durch die geringe Schichtstärke sind hohe Oberflächenqualitäten erzielbar.

### **Laserauftragschweißen**

Beim Laserauftragschweißen wird durch einen Laserstrahl ein lokal begrenztes Schmelzbad auf der Oberfläche eines metallischen Werkstücks generiert. Durch eine Zufuhrreinrichtung wird in dieses Schmelzbad der metallische Werkstoff (meist in Pulver- oder Drahtform) eingebracht. Durch die Bewegung dieses Schmelzbades über die Werkstoffoberfläche kann somit eine raupenförmige Linie erzeugt werden. Um den aufgeschmolzenen Werkstoff vor Oxidation zu schützen, läuft der Prozess meist in Schutzgas ab. Durch das Übereinanderlegen mehrerer Schichten werden dreidimensionale Materialvolumina aufgebaut. Die generativ aufgebauten Bauteile sind in ihrer Dichte vergleichbar mit konventionell hergestellten Bauteilen aus dem gleichen Werkstoff. Durch Laserauftragschweißen erstellte Bauteile besitzen meist ein relativ grobes Gefüge, das einem Gussgefüge sehr ähnlich ist. Weiterhin ist durch den Prozess bisher nur eine geringe Oberflächenqualität zu erreichen.

## **2.6 Vorteile der Additiven Fertigungsverfahren**

Zu Beginn des 3D-Druckens Mitte der 80er Jahre war das Ziel, produktähnliche Teile zu erstellen, die man „anfassen“ und gegebenenfalls auch zusammenbauen kann. Heute nennt man das „Rapid Prototyping“.

Später hat man bessere Maschinen und vielfältige neue Werkstoffe entwickelt, sodass 3D gedruckte Teile - mit entsprechender Sorgfalt geplant und gefertigt - auch industriell eingesetzt werden können.

Die Bedeutung der Additiven Fertigung (AM = Additiv Manufacturing) entwickelt sich mit den Möglichkeiten, auch Metalle zu „drucken“ immer weiter Richtung industrieller Fertigung. Die wichtigsten Gründe für den Einsatz der Additiven Fertigung gegenüber Fräsen und Bohren sind:

### **Schneller und „on Demand“**

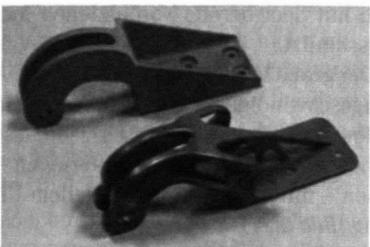
Ersatzteile müssen z.T. über Jahrzehnte vorgehalten werden - AM ermöglicht eine Fertigung sozusagen „über Nacht“ - die Kosten der Lagerhaltung entfallen.

### **Preiswerter**

Ist die Stückzahl gering, erspart man sich teure Formen und Werkzeuge - das erspart Zeit und Kosten. Beispiele sind Prototypen, Betriebsmittel, Implantate.

### **Leichter (Bild 2.18)**

Gewicht ist in der Luft- und Raumfahrt ein erheblicher Kostenfaktor - gerade im Flugzeugbau sind über die Lebenszeit lassen sich erhebliche Kerosin-Mengen einsparen. Aber auch im Maschinenbau - bei immer kürzeren Taktzeiten und damit höheren Beschleunigungen wird Gewichtsreduktion immer wichtiger.

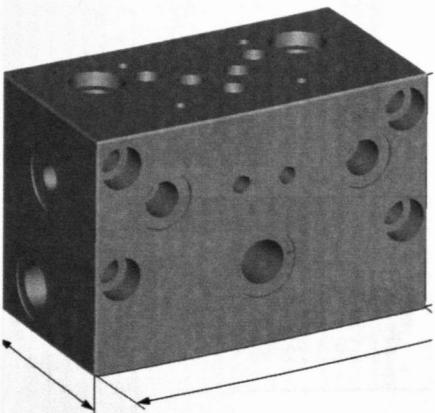


*Bild 2.18: Airbus Türaufhängung:  
oben traditionell, unten mit AM gefertigt –  
50 % Gewichtseinsparung!*

AM erlaubt es, konventionelle Rahmenbedingungen auszublenden (Mindestwandstärken, Entformschrägen, u. a.)

#### **Neue oder verbesserte Funktionen**

Konstruktionen müssen sich nicht mehr an bisherige Fertigungsverfahren richten und können rein funktional entworfen werden. Beispiel: Hydraulik-Block, Bild 2.19.



*Bild 2.19: Hydraulik-Blockventil, links konventionell gefertigt, aus Kostengründen ein Quader mit möglichst wenigen Bohrungen. Rechts mit AM gefertigt  
Ergebnis: Gewichtseinsparung 80 % – und was noch wichtiger ist: Da die „Bohrungen“ nicht mehr gerade sein müssen, sondern sich dem optimalen Fluss annähern können, ergibt sich im Betrieb ein um 50 % geringerer Druckverlust*

#### **Zykluszeiten**

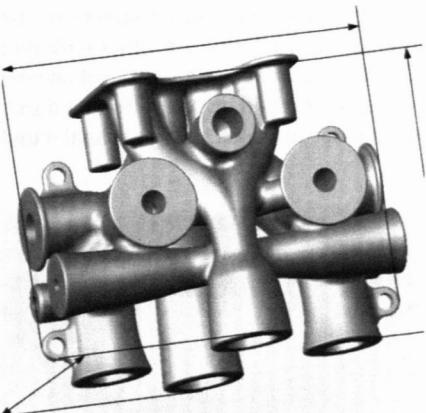
Kühlbohrungen in Spritzgusswerkzeugen müssen nicht mehr gerade sein, sondern können sich nah an der Artikelgeometrie orientieren. Das bringt zwei Vorteile: Weniger Verzug beim Abkühlen und deutlich geringere Zykluszeiten!

#### **Weniger Teile**

Traditionell können Teile keine beliebige Kontur annehmen – und im Allgemeinen auch nur aus einem Material bestehen. Mit AM-Verfahren lassen sich sowohl mehrere Teile zusammen drucken (*Bild 2.20*: Einsparung von Schweißen und/oder Montage) als auch mehrere Materialien kombinieren (z.B. beweglicher Schlauch mit festen Flanschen).

#### **Reparaturen**

Ein weiterer wichtiger Anwendungsfall ist die Reparatur von Produkten, das soge-



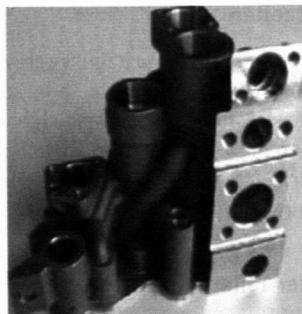


Bild 2.20: Vergleich, links AM-gefertigt, rechts traditionell mit fräsen und bohren

nanntes „Cladding“. Insbesondere bei komplexen Produkten aus hochwertigen Materialien (z. B. Turbinenschaufeln) lohnt sich eine Reparatur anstatt der Fertigung eines neuen Teiles. Dabei wird das defekte Produkt gescannt, mit der Soll-Geometrie verglichen und die Differenz additiv aufgebaut und bei hohen Genauigkeitsanforderungen anschließend fertig gefräst.

Es gibt hier eine Reihe von weiteren physikalischen Methoden, das bekannteste ist das LMD (Laser Metal Deposition). Hierbei wird Metallpulver auf bereits vorhandene Teile gestrahlt und im Auftreffpunkt durch einen Laser so erhitzt, dass es schmilzt und



Bild 2.21: Stahl und Bronze in einem Teil  
(Quelle: DMG Mori)

sich mit dem bereits vorhandenen Metall verschmilzt.

Der große Vorteil ist die relativ hohe Aufbaugeschwindigkeit sowie exzellente Materialqualität. Bei mehreren Düsen lassen sich sogar verschiedene Materialien mischen – mit festem oder graduellem Übergang (Bild 2.21).

### Hybrid-Maschinen (Bild 2.22)

Für den industriellen Einsatz gedruckte Teile müssen grundsätzlich an Funktions- und Anschlussbereichen spanend nachgearbeitet werden. Zusätzlich muss die ebenfalls aus Metall gedruckte Stützgeometrie entfernt werden – meistens ebenfalls durch Fräsen.

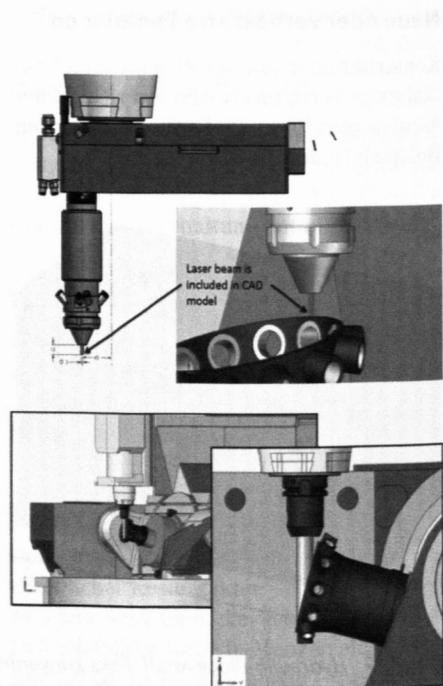


Bild 2.22: 3D Modell - Material-Auftrag (AM) und Abtrag (Fräsen) auf einer Maschine  
(Quelle: DMG-Mori)

Nach heutigem Stand sind diese Nacharbeiten überwiegend noch nicht im automatischen Prozessablauf integriert und die Übergabe erfolgt manuell. Allerdings sehen wir den Trend, hier zukünftig stark zu automatisieren.

Einen interessanten Ansatz verfolgen einige Werkzeugmaschinenhersteller. Sie entwickeln Maschinen, die in einer Aufspannung Materialauftrag (Laser) und Materialabtrag (Fräsen, Schleifen) ausführen können: Hybrid Machining

## 2.7 Zusammenfassung

Generative Fertigungsverfahren können für die Herstellung von Prototypen, Formwerkzeugen und Endprodukten eingesetzt werden. In allen Fällen muss das zu produzierende Bauteil als 3D-CAD-Modell vorliegen. Die Produktion kann, in Abhängigkeit des späteren Verwendungszwecks,

mit sehr unterschiedlichen Schichtbauprozessen erfolgen. Neben den aufgelisteten Verfahren existieren noch weitere, die sich jedoch nur marginal von den erwähnten unterscheiden.

Aktuelle Entwicklungen der generativen Fertigungsverfahren in der Industrie und Forschung sind sehr vielschichtig. So wird u.a. an einer Beschleunigung des Fertigungsprozesses, z.B. durch höhere Laserleistungen und damit größere Aufbauraten gearbeitet. Darüber hinaus müssen nach dem generativen 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 generative Fertigungsverfahren kontinuierlich neue Anwendungsbereiche erschließen lassen.

## Additive Fertigungsverfahren



### **Das sollte man sich merken:**

1. **Additive Fertigungsverfahren** fügen formloses oder formneutrales Material schichtweise zu einem physischen Werkstück direkt aus den 3D-CAD-Daten zusammen.
2. **Rapid-Technologien** setzen sich aus generativen und abtragenden Fertigungsverfahren zusammen und haben das Ziel, schnell Bauteile oder Werkzeuge zu produzieren.
3. Bezuglich der Datenverarbeitung müssen für generative Fertigungsverfahren drei Voraussetzungen erfüllt sein:
  - Es existieren Datenmodelle der zu fertigenden Teile auf 3D-CAD-Systemen.
  - In der Prozessvorbereitung wurde das Volumen-/Oberflächenmodell in einzelne, verarbeitbare Schichten zerlegt.
  - Es wurde ein verfahrensspezifisches NC-Programm erstellt.
4. Generativ hergestellte Bauteile sind je nach verwendetem Verfahren in ihrer Konsistenz, Genauigkeit und Oberfläche sehr unterschiedlich.
5. Heute wird eine Vielzahl an generativen Verfahren industriell eingesetzt; dabei spielt der Produktentstehungsprozess eine wichtige Rolle.
6. Die heute bekannten generativen Prozesse können nach zwei Gesichtspunkten eingeteilt werden:
  - Nach dem **Ausgangsmaterial**: Pulverförmige, flüssige oder feste Materialien
  - Nach der **Art der Formgebung**: direkt dreidimensional oder durch Aufeinander schichten zweidimensionaler Einzelschichten
7. Alle heutigen, kommerziellen Verfahren arbeiten zweidimensional.
8. Die derzeit fünf wichtigsten Verfahren sind:
  - das **Strahlschmelzen** funktional einsetzbarer metallischer Bauteile und Prototypen
  - das **Lasersintern** von pulverförmigen Kunststoffen oder ein-/zweikomponentigen Metallen
  - das **3D-Drucken**, d. h. das pulverförmige Ausgangsmaterial wird durch das gezielte Einbringen einer Binderflüssigkeit verfestigt
  - das **Fused Deposition Modelling**, welches thermoplastische Kunststoffdrähte in einer Düse erhitzt und das Material raupenförmig aufschmilzt
  - die **Stereolithographie**, d. h. schichtweise Polymerisation von flüssigem Harz
9. Unter **Rapid Prototyping** versteht man die schnelle Herstellung von Anschauungsobjekten, bzw. Modellen die nur eingeschränkt Funktionen des späteren Bauteils erfüllen.
10. Unter **Rapid Tooling** versteht man die die Herstellung von Werkzeugen und Formen für die Prototypenfertigung bzw. die Produktion von Serienbauteilen.
11. Mit **Rapid Manufacturing** bezeichnet man Fertigungsprozesse, die die direkte Produktion von funktional einsetzbaren Bauteilen (Endprodukten) zulassen.