

3.2.4 Lasersintern – EOS GmbH

EOS(INT) P: Formiga P 110, P 396, P 760, P 800

EOS(INT) M: PRECIOUS M 080, M 100, M 280, M 290, M 400

EOSINT S: s750

Electro Optical Systems GmbH (EOS), Krailing-München, Deutschland

Kurzbeschreibung

Additive Anlagen zum direkten Versintern von Kunststoffen (P) und Metallen (M). Die Maschinen arbeiten nach dem Laser-Scanner-Prinzip. Ein Laser scannt die Oberfläche des Pulverbetts und schmilzt die Partikel an oder auf, die nach Erstarrung eine Schicht bilden. Nach Absenkung der Bauplattform und Neubeschichtung wird der Prozess erneut durchlaufen, bis das Bauteil fertiggestellt ist. Verfahrensbedingt sind keine Stützen notwendig.

Für die Verarbeitung von Kunststoffen und Metallen gibt es für den jeweiligen Werkstoff optimierte Maschinen.

Maschinen zur Verarbeitung von Gießereisanden werden auf der Internetseite der Firma nicht mehr angeboten. Die entsprechenden Informationen sind im Abschnitt 3.2.4 „Lasersintern – EOS“ der 4. Auflage dieses Buches zu finden.

Anwendungsbereich

Kunststoffe (EOS(INT) P):

Konzeptmodelle, Funktionsprototypen, Endprodukte aus Kunststoff direkt oder aus Metall über Feinguss

Metalle (EOS(INT) M):

Technische Prototypen, Direktes Tooling (Endprodukte über Tooling)

Entwicklungsstand

Kommerzialisiert seit 1994 (P) und seit 1995 (M, S).

Historisches

EOS wurde 1989 im Rahmen eines Projektes mit der BMW AG zur Entwicklung einer Stereolithographie-Anlage von Dr. Langer gegründet. Schon nach der ersten Stereolithographie-Maschine 1991 wurde eine Sintermaschine zum Kunststoff-sintern entwickelt und zur EOSINT-Modellreihe ausgebaut. Die EOS(INT)-P-Baureihe bezeichnet Maschinen zum Versintern von Polystyrol und Polyamid. Sie wurde 1994 mit der P 350 begründet und führte über die P 360, P 380 zur P 385 (2005) und zur P 396 (2014). Zur Baureihe gehört auch die größte Kunststoff-Sintermaschine, die Doppel-Laseranlage P 700 (1999) in der aktuellen Version als P 760.

EOS(INT)-M, die Baureihe zum Direktversintern von pulverförmigen Metalllegierungen und Metallen, startete 1994 mit dem Prototypen M 160. Es folgten EOS M 250/ M250 X^{tended}, M270 (2004) und M 280 (2010) und M 400 (2014).

Zum Versintern von Formsanden wurde aus der P 350, P 760 und P 800 sowie die S 350 eine Anlage zur Herstellung von (vorzugsweise) Kernen für den Sandguss entwickelt. Darauf folgten die Doppel-Laseranlagen EOSINT S750. Die Sandlinie wird auf der Internetseite der Firma nicht mehr aktiv beworben.

Bis zur Aufgabe des Stereolithographie-Geschäftes war EOS weltweit die einzige Firma, die zugleich Stereolithographie- und Sintermaschinen baute.

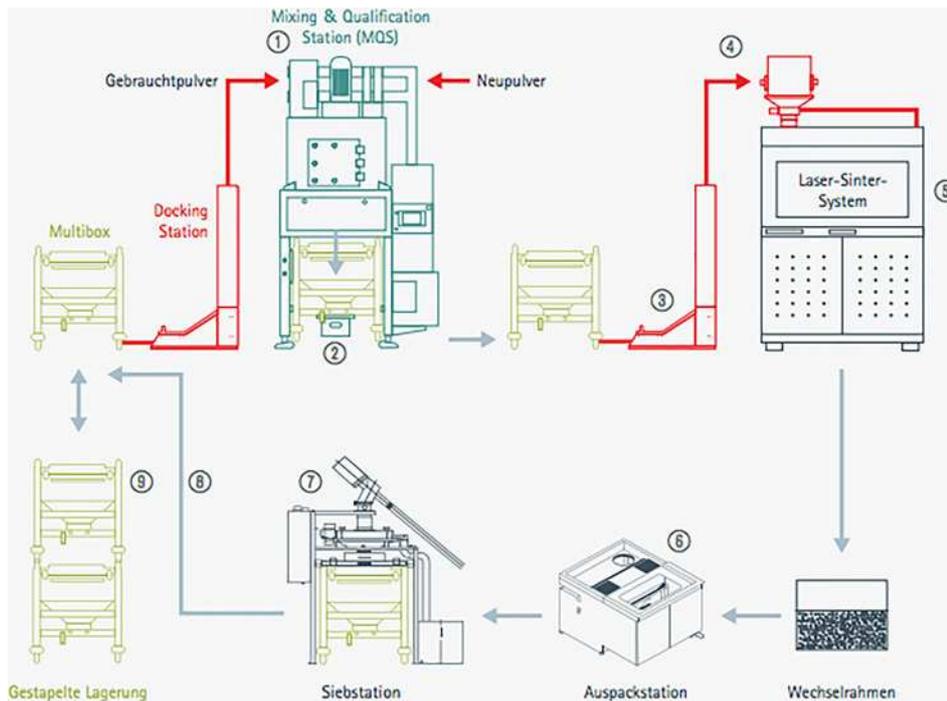
Strategien/Entwicklungspartner

EOS setzt auf die Optimierung eines Maschine-Werkstoff-Systems. Die Baureihe P ist für die Verarbeitung von Kunststoffen ausgelegt, die Baureihe M für Metalle und die Baureihe S für Sande. Die Leistung der Laser, die Scanner und die Scanstrategien sowie die Materialhandhabungs- und Beschichtungssysteme sind auf das jeweilige Material abgestimmt. Details wie Stickstoffgeneratoren sind nur dann vorhanden, wenn das Material es erfordert. EOS setzt auf Entwicklungspartnerschaften mit Materialherstellern, wie z. B. Electrolux (Finnland), mit Softwarelieferanten und mit dem Maschinenhersteller TRUMPF. Anfang 2004 konnte ein langjähriger Patentstreit mit 3D Systems gütlich beigelegt werden. Dem Vernehmen nach wird 3D Systems auf der Basis dieser Vereinbarung die Doppel-Lasertechnologie von EOS einsetzen. Seit Ende 2005 gibt es eine Kooperation mit 3D Micromac, Chemnitz, zur gemeinsamen Anwendung des Mikro-Lasersinterns im Rahmen eines Technologie- und Dienstleistungszentrums.

EOS fokussiert strategisch auf den Markt des Rapid Manufacturing und besetzt dazu aktiv das Themenfeld e-Manufacturing, das auch als Wortmarke geschützt ist. Die Maschinen können durch Zusatzmodule, z. B. IPCM P/M plus (Integrated Process Chain Management, Plastic/Metall) zum Pulvermanagement und zum Auspacken, entsprechend zu Fertigungsanlagen ausgebaut werden (Bild 3.36).

Datenformate/Software

Die Maschinen lesen vollständige STL- und Konturdaten (CLI, Common Layer Interface) ein. Optional gibt es auch Interfaces für Standardformate. Die Software ist unter dem Name EOS RP-Tools zusammengefasst. Sie umfasst auch die Datenaufbereitungssoftware EOSPACE (V3.0, 2005) zur optimierten, automatischen Platzierung von Bauteilen im Bauraum. Alternativ stehen die Softwarepakete Magics von Materialise und Expert Series von Deskarts zur Verfügung. Die EOS Prozess-Software heißt PSW (V3.7). Sie enthält eine Vielzahl von Features für eine optimale Bauteilgenauigkeit, -qualität und Baugeschwindigkeit sowie für eine optimierte Systemproduktivität und Benutzerfreundlichkeit.



1. Mischstation
2. Sensor gesteuerte Bodenklappe. Entleerung in eine Multibox
3. Docking-Station zum Laser-Sinter-System
4. Adapter für Pulverbehälter (EOS P 3 oder EOSINT P 7)
5. Laser-Sinter-System
6. Auspackstation mit Aufnahme für den Wechselrahmen
7. Siebstation mit Entleerung in eine Multibox
8. Rückführung Multibox zur Mischstation
9. Gegebenenfalls gestapelte Lagerung von Multiboxen

Bild 3.36 IPCM P plus (Integrated Process Chain Management)
Integriertes Werkstoffmanagement für EOS-Polymer-Systeme
Quelle: EOS GmbH

Prinzip der Schichtgenerierung

Das Prinzip der Schichtgenerierung entspricht dem in Abschnitt 3.2.1 „Maschinenspezifische Grundlagen“ beschriebenen, für das Lasersintern typischen Verfahren. Die Maschine arbeitet nach dem Laser-Scanner-Verfahren. Insbesondere für den Metallprozess wurde das ursprünglich für die Stereolithographie entwickelte *Skin and Core*-Verfahren derart modifiziert, dass für die Außen- und für die Innenstruktur unterschiedliche optimale Bauparameter vorgegeben werden können.

Die Scanstrategie ist dem jeweiligen Material angepasst.

Bauart/Konstruktion

EOSINT P – Kunststoff-Sintermaschinen

Die EOS P Maschinen arbeiten nach dem Laser-Scanner-Prinzip. Sie verfügen über CO₂-Laser von 30 W (P 110), 70 W (P 396) und 2 × 50 W (P 760 und P 800). Zur Steigerung der Abbildungsqualität werden Planfeldlinsen (F-Theta-Linse) eingesetzt. Verfügbar ist auch ein Dual Fokus Modul, mit dem der Strahldurchmesser während des Baus verändert werden kann. Die Konturierung kann so sehr präzise aber langsamer erfolgen, während das Auffüllen der Flächen mit größerem Strahldurchmesser und damit deutlich schneller geschieht.

Die kompakte EOSINT P 110 Formiga (portugiesisch: Ameise) passt durch eine Tür (1067 mm Breite). Dadurch ist eine Aufstellung in Laboren und normalen Räumlichkeiten möglich und der Aufwand für die Installation ist entsprechend gering.

Sie hat einen rechteckigen Bauraum von circa $x, y, z = 200 \times 250 \times 330$ mm Größe. Sie baut in Schichten von 0,06, 0,1 und 0,12 mm. Der Bauraum der EOSINT P 396 (Bild 3.37) misst circa $x, y, z = 340 \times 340 \times 600$ mm bei einer maximalen Bauhöhe von 660 mm. Die EOSINT P 760 weist einen etwa doppelt so breiten, deutlich größeren Bauraum von circa $x, y, z = 700 \times 380 \times 580$ mm auf. Sie arbeitet simultan mit zwei Laser-Scanner-Einheiten. Die EOS P 800 ist die größere Variante der EOS P 395 ($x, y, z = 700 \times 380 \times 560$ mm).



Bild 3.37 EOS P 396 Sintermaschine
Quelle: EOS GmbH

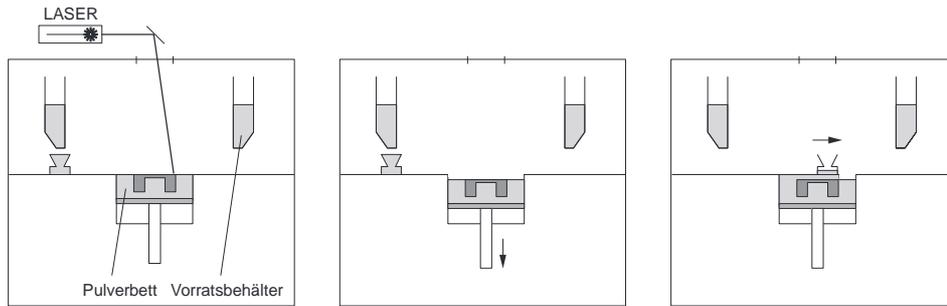


Bild 3.38 Beschichtungssystem EOSINT P (schematisch)

Das Beschichtungssystem für die Kunststoffe verarbeitenden Maschinen ist schematisch in Bild 3.38 wiedergegeben. Es besteht aus einer rinnenartigen, zum Pulverbett hin konvergierenden offenen Pulverzuführeinheit, die wie ein Füllschuh über das Pulverbett streicht und dabei das nötige Pulver aufträgt. Zur Optimierung des Fließverhaltens des Kunststoffpulvers vibriert die gesamte Einheit. Das Beschichtungssystem ist so ausgelegt, dass das Pulverbett bewusst leicht vorverdichtet wird. Die Maschine verfügt über eine Online-Kalibrierung zur kontinuierlichen Überwachung und Korrektur des Laserstrahls während des Bauprozesses.

Die zum Einschluss des Pulverbetts notwendigen Begrenzungswände werden während des Bauprozesses mitgebaut. Dies erfordert zwar Bauzeit und Material, ermöglicht aber das Herausnehmen des kompletten, in diese Wandung und das stützende Pulver eingebetteten Modells aus der Maschine. Durch diese konstruktive Maßnahme muss kein kompletter Kühlvorgang erfolgen, was aufgrund der schlechten Wärmeleitung von Kunststoffen Stunden dauern kann, sondern das Modell kann im Pulverkuchen eingebettet heiß aus der Maschine genommen und extern gezielt abgekühlt werden. Auf diese Weise verkürzen sich die Wiederbeschickungszeiten zwischen zwei Bauvorgängen. Optional wird ein portabler Behälter angeboten, der das Bauen der Umfassungswände überflüssig macht. Die EOS-Maschinen verfügen über einen integrierten Stickstoffgenerator, der den Betreiber von Gaslieferungen unabhängig macht. Dies, und ein automatisches Pulvermanagement erweitern die Maschine zu einem (semi-manuellen) Additiven Fertigungssystem, IPCM P plus (Integrated Process Chain Management, Plastic) Integriertes Werkstoffmanagement für EOS-Polymer-Systeme (Bild 3.36).

Die EOSINT P 760 verfügt über einen so breiten Bauraum, dass die meisten Bauteile hineinpassen, die im Automobilbau, vorzugsweise im Motorenbau, vorkommen. Um die Produktivität zu erhalten, werden zwei simultan arbeitende 50 W CO₂-Lasersysteme eingesetzt. Die Laserstrahlquellen und die sonstigen technischen Daten entsprechen weitgehend den für die P 396 gültigen Werten.

Die Schichtdicken betragen zwischen 0,06 und 0,18 mm und sind materialabhängig.

Kalibrierung der Maschine: Das als Optical Scanner Calibration bezeichnete System führt den Laserstrahl über ein thermosensitives Papier. Das Ergebnis wird anschließend außerhalb der Maschine mithilfe einer Videobildverarbeitung analysiert und schlägt eine Kalibrierung vor. Die Kalibrierung dauert in der Maschine, je nach Rasterabstand (typischerweise 5 mm) und Maschinengröße, zwischen einer $\frac{1}{4}$ Stunde und einer $\frac{3}{4}$ Stunde. Gemeinsam mit der Auswertung und der daran anschließenden Kalibrierung vergehen einige Stunden, wenn dies im eigenen Haus durchgeführt werden kann. Die Auswertung beim Hersteller dauert entsprechend länger.

EOSINT M – Metall-Sintermaschinen

Die EOS M Serie umfasst Maschinen zum Versintern von Metallpulvern. Diese Technologie nennt EOS Direct Metal Laser Sintering (DMLS). Es gibt bezüglich Material und Bauparameter spezialisierte Anwendungen zur Herstellung von Formen und Formeinsätzen (DirectTool Prozess) und zur direkten Herstellung von Metallbauteilen (DirectPart-Prozess).

Die Software erlaubt neben der Übergabe der Geometriedaten auch die Übermittlung von Referenzpunkten, die die Nachbearbeitung mit konventionellen Werkzeugmaschinen sicher und effektiv ermöglichen.

Konstruktive Details der EOS M280 und ihrer Weiterentwicklung, der EOS M 290 sind der allseitig umschlossene Bauraum von netto $x, y, z = 250 \times 250 \times 325$ mm Größe. Der Vorratsbehälter liegt unter der Bauplatzform und mündet in die Bauebene. Das Beschichtungssystem nimmt von dort Material auf, verteilt es über die Bauebene und führt die überschüssige Menge in den Überlaufbehälter ab. Es arbeitet eindirektional und streicht folglich für jeden Beschichtungsvorgang zweimal über die Bauebene. Das Beschichtungssystem (Recoating) ist als feste asymmetrische Klinge ausgebildet. Die Scannerspiegel sind gekühlt, um thermische Verzüge zu vermeiden und die Genauigkeit auf diese Weise zu steigern (Bild 3.39).

Die EOS M 280 ist wahlweise mit einem 200 W oder einem 400 W Yb (Ytterbium)-Faserlaser ausgestattet; die EOS M 290 hat serienmäßig einen 400 W-Faserlaser, der höchste Strahlqualität, hohe Strahlintensität und hohe Dynamik vereinigt. Ein variabler Fokus (Standard 0,1 und bis 0,5 mm) und eine vollständig gasdicht abgeschlossene Prozesskammer sind die Grundlage für die effektive Versinterung unterschiedlicher Metallpulver.

Die Bauteile werden auf einer geschliffenen Lochplatte gefertigt. Sie verfügt über spezielle Spann- und Positionierelemente und legt so Referenzpunkte und -flächen aus dem CAD reproduzierbar fest. Diese können für nachfolgende Messoperationen oder spanende Bearbeitungsschritte als Aufnahme verwendet werden. Ein Pulver-Siebmodul und ein Pulver-Fördermodul können nachgerüstet werden und ermöglichen als IPCM M plus (Integrated Process Chain Management), Metall) ein integriertes Werkstoffmanagement.

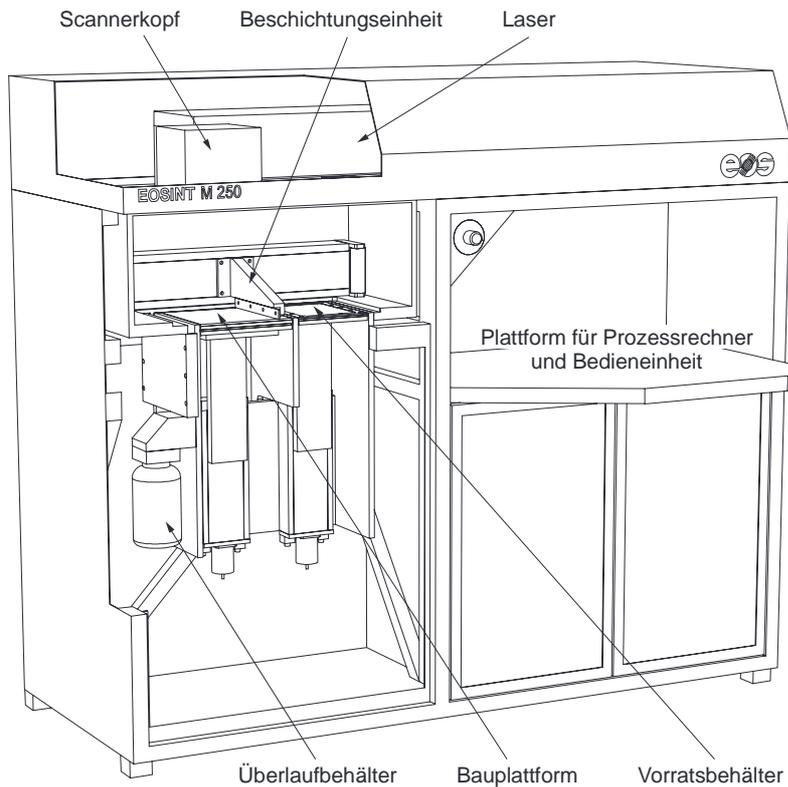


Bild 3.39 EOS M, Sintermaschine für Metalle, schematischer Aufbau
Quelle: EOS GmbH

Die EOS M 400 (Bild 3.40) ist als System zur additiven Fertigung großer Metallbauteile und als industrielle Produktionsmaschine konzipiert. Sie hat einen Bauraum von netto $x, y, z = 400 \times 400 \times 400$ mm Größe.

Die EOS M 400 besteht aus einer Prozess-, einer Rüst- und einer Auspackstation, die in ein Maschinengestell integriert sind. Durch diesen modularen Ansatz können zukünftige Innovationen einfach integriert werden. Damit ist ein Pulverhandling im geschlossenen System möglich.

Die Maschine arbeitet mit einem 1 kW Yb-Faserlaser. Eine Planfeldlinse (F-Theta-Linse) sorgt für die optimale Belichtung des großen Baufeldes. Der Laserstrahldurchmesser beträgt circa $90 \mu\text{m}$. Der digitale Scanner erreicht eine Geschwindigkeit von bis zu 7,0 m/s

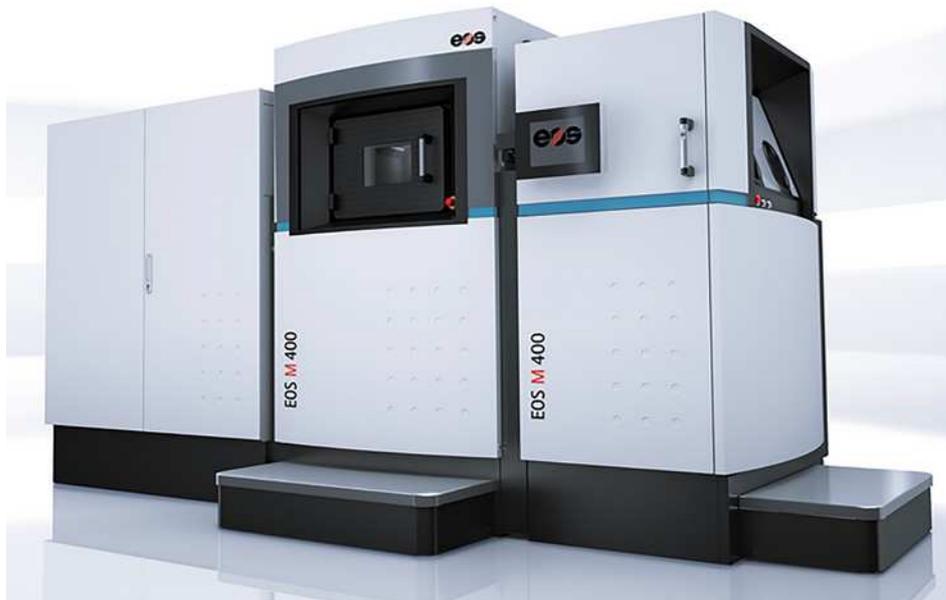


Bild 3.40 EOS M 400. Sintermaschine und Fertigungssystem für Metalle
Quelle: EOS GmbH

Material/Bauzeit/Genauigkeiten

EOS vertreibt selbst entwickelte Materialien, die auch umfangreich dokumentiert sind, beteiligt sich aber auch an den Werkstoffentwicklungen der Kunden. Naturgemäß werden die Ergebnisse solcher Entwicklungen weniger detailliert kommuniziert.

Material – Kunststoffe

Ungefüllte Polyamide (PA 2221, PA 3200GF, PrimePart). In den EOSINT-Maschinen werden als Standardmaterialien Feinpolyamide ähnlich PA 12 eingesetzt. Sie sind ohne Glasfüllung als Primepart Plus PA 2221 oder mit Glasfüllung als PA 3200GF verfügbar. Die Korngrößen betragen circa 60 μm . Die Festigkeiten erreichen bis zu 90 % der Werte, in Einzelfällen auch mehr, die spritzgegossene Bauteile aus formal identischen Werkstoffen aufweisen. Die Bauteile eignen sich deshalb nicht nur hervorragend als Funktionsmodelle und zur Simulation von Spritzgussteilen sondern auch für die direkte Fertigung. Dies begründet auch den Einsatz des Sinterns im Rahmen des e-Manufacturing (siehe Kapitel 6 „Direct Manufacturing – Rapid Manufacturing“). Das Polyamid PA 2200 ist als biokompatibel zertifiziert.

PrimePart ST (PEBA 2301) ist ein flexibles Polyetheramid mit gummiähnlichen Eigenschaften.

Gefüllte PA 12-Polyamide (AluMide, CarbonMide, Flammgeschützte Polyamide). Das AluMide ist ein mit Aluminiumpulver gefülltes Polyamid. Dadurch ergibt sich eine

Metalloptik mit interessanten Farb- und Oberflächeneffekten, vor allem wenn die Bauteile nach dem Bauprozess poliert werden. AluMide weist etwa den E-Modul des PA 3200 GF und die Zugfestigkeit des PA 2221 auf, hat aber mit circa 170 °C eine um 40 °C höhere Temperaturbeständigkeit. EOS fertigt mit diesem Material z. B. die Griffe der EOS M 270 und unterstreicht damit auch in der eigenen Fertigung die Strategie des e-Manufacturing.

CarbonMide (2005) ist ein mit Kohlenstoff (Carbon)-Kugeln gefülltes PA 12-Polyamid, das eine höhere Festigkeit, geringeres Gewicht und eine interessante schwarze Optik miteinander verbindet.

Im Jahr 2005 wurde als weltweit erster flammgeschützter Werkstoff für das Lasersintern ein flammgeschütztes Polyamid vorgestellt. Das Polyamidmaterial auf der Basis des PA 3200 erfüllt mehrere relevante Luft- und Raumfahrtvorschriften, so die JAR/FAR 25¹⁵, Anhang F, für Entflammbarkeit (Teil 1) und Rauchdichte (Teil 5) sowie die ABD0031/AITM 3.0005 (2) (Airbus) und die BSS 7239 (Boeing) für Rauchdichte in der Klasse Wandstärken ab 2 mm. Darüber hinaus wurde für Wandstärken über 2 mm die Klassifizierung V0 gemäß der Richtlinie UL94¹⁶ erreicht. Mit diesen Klassifizierungen stellt EOS ein flammgeschütztes Material zur Verfügung, das sich für die Endprodukthanwendungen in Flugzeugen qualifiziert hat. PA 2241 FR ist ein flammgeschütztes Polyamid 12 mit halogenhaltigem Flammschutzmittel. Dagegen ist PA 2210 FR ein weißes Polyamid 12-Pulver, das mit einem halogenfreien, chemischen Flammschutzmittel arbeitet.

Mit dem Hochtemperatur-Werkstoff EOS PEEK HP3 steht für die EOS P 395 und die EOS P 800 ein Hochleistungspolymer zur Verfügung.

Polystyrole (PS 2500, PrimeCast 101). Als ausschmelzbares Material für den Feinguss sind die amorphen Polystyrolpulver (engl.: Polystyrene) PS 2500 und das neuere PrimeCast 101 verfügbar. Mit PrimeCast 101 können dünnere Schichten erzeugt und damit feinere Details abgebildet werden. Polystyrol kann bei relativ niedrigen Temperaturen verarbeitet werden, was einen geringeren Schrumpfung und eine höhere Modellgenauigkeit begünstigt. Der Bauprozess ist zudem deutlich schneller als bei Polyamid. Für den Feingussprozess muss das Bauteil, z. B. durch Bewachsen, versiegelt werden.

¹⁵ JAR (Joint Aviation Requirements) der JAA sind das europäische Äquivalent zu den FAR (Federal Aviation Regulations) der FAA. Die JAA (Joint Aviation Authorities) ist ein Zusammenschluss der zivilen Luftfahrtbehörden von 34 europäischen Ländern. Die FAA (Federal Aviation Administration) ist die Bundesluftfahrtbehörde der Vereinigten Staaten.

¹⁶ UL (Underwriters Laboratories): eine Organisation zur Überprüfung und Zertifizierung der Produktsicherheit. UL94 regelt die Flammausbreitung.

Material – Metalle

Materialien zur Herstellung von Metallbauteilen sind Einkomponentenpulver oder „Legierungen“. Sie werden in einem Arbeitsgang direkt versintert.

DirectSteel H20 ist ein 20 µm Pulver auf Stahlbasis. Es wurde bereits 1998 (als DirectSteel 50 V1) als erstes in einer kommerziellen additiven Anlage einsetzbares reines Stahlpulver vorgestellt. Die Angaben des Herstellers „ohne Kunststoffbinde-mittel“, die Schmelztemperatur „über 700 °C“ und die Zugfestigkeit von bis zu 1100 MPa deuten darauf hin, dass durch entsprechende Optimierung der Legierungsbestandteile (Cr, Ni, Mo, Si, V, C) ein für Stahl relativ niedrig schmelzender Werkstoff entwickelt wurde, dessen Eigenschaften in etwa dem von Stahlguss entsprechen. Die Wärmeleitfähigkeit ist mit $\lambda = 25 \text{ W/mK}$ (bei 23 °C) deutlich geringer als die von Stahl ($\lambda = 45 \text{ W/mK}$) und fällt mit der Temperatur noch deutlich ab. Der entscheidende Schritt besteht aber darin, ein dichtes Bauteil (Dichte = $7,8 \text{ g/cm}^3$) ohne aufwendige Folgeprozesse und deshalb ohne den dadurch verursachten Verzug direkt zu versintern. Es werden Oberflächenhärten von über 40 HRC erreicht. Zur Beschleunigung stehen je nach Anforderung an die Oberflächen auch Parametersätze für Schichtstärken von 40 und 60 µm zur Verfügung. Freistehende Wände werden mit einer Wandstärke bis 0,28 mm realisiert. Eine Infiltration ist weder notwendig noch aufgrund der hohen Dichte sinnvoll möglich. Das Material kann spanend bearbeitet und drahterodiert werden.

StainlessSteel GP1 ist ein Edelstahl, der der europäischen Werkstoffnummer 1.4543 entspricht. Er zeichnet sich durch eine sehr hohe Korrosionsbeständigkeit, gute mechanische Eigenschaften und durch eine hervorragende Duktilität ohne weitere Nachbehandlung aus. Dieser Werkstoff wird besonders für die Herstellung von Bauteilen (DirectPart) empfohlen. Mit Standardparametern können Schichtdicken von 20 µm hergestellt werden. Der Werkstoff schmilzt vollständig auf. Die Bauteile sind daher vollkommen dicht und haben nahezu isotrope Eigenschaften. Um den Bauprozess zu beschleunigen, kann auch das Hülle-Kern-Verfahren angewendet werden. Die Bauteile können nicht-additiv bearbeitet, also auch geschweißt, mikrogestrahlt, poliert oder beschichtet werden.

StainlessSteel PH1 ist ein vorlegierter Edelstahl. Der Werkstoff entspricht DIN 1.4540.

StainlessSteel 316L ist ein korrosionsresistenter, auf Eisen basierender Werkstoff, der für die Verarbeitung auf der EOS M 280 optimiert wurde. Er entspricht ASTM F138 “Standard-Schmiede-Qualität für 18Cr-14Ni-2.5Mo Edelstahlteile und Draht für Chirurgische Implantate (UNS S31673)”.

CobaltChrome MP1 ist eine sehr feinkörnige, Kobalt-Chrom-Molybdän-basierte Pulvermischung. Sie zeichnet sich durch sehr gute mechanische Eigenschaften sowie durch Korrosions- und Temperaturbeständigkeit aus. Sie entspricht der chemischen Zusammensetzung der UNS R31538 CoCrMo-Legierung, ist nickelfrei (< 0,1 %

Nickelgehalt) und sterilisierbar. Sie eignet sich daher besonders für biomedizinische Anwendungen. Die lasergesinterten Bauteile erfüllen vollständig die Anforderungen von ISO 5832-4 und ASTM F75 für gegossene CoCrMo-Implantatlegierungen, sowie, bis auf die Dehnung, die Anforderungen von ISO 5832-12 und ASTM F1537 für geschmiedete CoCrMo-Implantatlegierungen. Durch heiß isostatisches Pressen (HIP) kann die Dehnung erhöht werden und erfüllt dann auch diesen Standard.

CoCr-Legierungen werden auch für hochbelastete Bauteile, z. B. in Flugzeugtriebwerken und im Motorenbau eingesetzt.

CobaltChrome SP2 ist eine Variante für die Zahntechnik. Es erfüllt zusätzlich zu den Eigenschaften von MP1 die besonderen Anforderungen von Zahnersatzelementen, die mit Dentalkeramik verblendet werden. EOS CobaltChrome SP2 Pulver ist ein Medizinprodukt gemäß Klasse IIa der Richtlinie 93/42/EWG, Anhang IX, Regel 8.

MaragingSteel MS1 ist ein martensitisch aushärtender Stahl. Seine chemische Zusammensetzung entspricht der US-Klassifizierung 18 Maraging 300 bzw. der europäischen 1.2709 und der deutschen X3NiCoMoTi 18-9-5. Er zeichnet sich durch höchste Festigkeit bei guter Duktilität aus. Er kann sehr gut spanend nachgearbeitet werden. Durch eine thermische Nachbehandlung erzielt man eine Härte bis circa 55 HRC. Er wird als Werkzeugstahl für Spitzguss- und Druckgussformen, aber auch für hochbelastete Maschinenteile eingesetzt. Die Bauteile können bei 490 °C für 6 Stunden auf über 50 HRC Härte nachgehärtet werden.

NickelAlloy HX ist eine Nickel-Chrom-Eisen-Molybdän Legierung in feiner Pulverform. Die Bauteile zeichnen sich durch hohe Festigkeit und Oxidationsbeständigkeit auch bei hohen Temperaturen aus und werden deshalb auch für Bereiche bis 1200 °C empfohlen.

NickelAlloy IN625 ist ein Nickel-Legierungspulver, welches hitze- und korrosionsbeständig ist. Die Legierung zeichnet sich durch sehr hohe Zug-, Kriech- und Bruchfestigkeit aus. Des Weiteren ist eine nachträgliche Wärmebehandlung des Materials möglich. Durch ihre hohe Korrosionsbeständigkeit eignen sie sich insbesondere für Anwendungen im maritimen Bereich, wo es auf eine hohe Beständigkeit gegen Lochfraß-, Spalt- und Spannungsrisskorrosion ankommt.

NickelAlloy IN718 ist ebenfalls eine Nickellegierung, welche in ihrer Zusammensetzung Inconel™ 718 entspricht. Aufgrund ihrer Alterungsbeständigkeit, Zug-, Warm- und Bruchfestigkeit, welche bis zu einer Temperatur von circa 700 °C erhalten bleiben, eignet sich diese Legierung insbesondere für Serienprodukte der Luft- und Raumfahrt. Weitere Anwendungen liegen im Bereich der chemischen Industrie, sowie der Erdöl-, Petroleum und Erdgas-Industrie.

AlSiMg10 ist eine Aluminiumgusslegierung, welche für dünnwandige Bauteile mit komplexen Geometrien eingesetzt wird. Die hohe Festigkeit und Härte wird durch

Anteile von Silizium und Mangan in der Legierung erzielt. Aufgrund der mechanischen Eigenschaften und der geringen Dichte findet die Legierung Anwendung im Motorsport, der Luftfahrt, der Pneumatik, der Automobiltechnik, sowie einigen weiteren Branchen. Aus dem Bauprozess resultiert ein Gefüge mit den mechanischen Eigenschaften ähnlich dem T6-Zustand gegossener Bauteile. Daher werden Wärmebehandlungen für Lasersinter-Bauteile nicht empfohlen, aber ein Spannungsarmglühen über 2 Stunden bei 300 °C.

Titanium Ti64 ist ein vorlegiertes Ti6Al4V-Pulver. Es handelt sich um eine Legierung für Struktur- und Triebwerksteile aus der Luft- und Raumfahrt, für Fahrwerksteile und auch für medizinische Implantate. Bauteile aus Titanium Ti64 erfüllen die Anforderungen der Normen ISO 5832-3, ASTM F1472 und ASTM B348 bezüglich ihrer chemischen Zusammensetzung.

Titanium Ti64ELI ist eine Variante des Ti6Al-4 mit höherer Reinheit („extra-low interstitial“) mit enger begrenzten Anteilen an Eisen und den interstitiellen (eingelagerten) Elementen C und O (alpha+beta Legierung). Aufgrund seiner hervorragenden Biokompatibilität eignet es sich vor allem für medizinische und zahnmedizinische Anwendungen.

Durch ein Mikrostrahlen genanntes Verfahren kann die Oberflächengüte auf circa $R_z = 20 \mu\text{m}$ verbessert werden. Mit im Werkzeugbau üblichen Poliermethoden sind Oberflächengüten bis $R_z = 3 \mu\text{m}$ zu realisieren.

Die beim DMLS-Prozess verwendete Lochplatte kann direkt auf Werkzeugmaschinen aufgespannt werden.

Die Materialien, die am Bauprozess teilgenommen haben, aber nicht zum Bauteil verarbeitet wurden, können vollständig wieder verwendet werden.

Bauzeit/Genauigkeiten

Es sind für das Lasersintern typische Bauzeiten und Genauigkeiten zu erzielen. Als Maß für die Baugeschwindigkeit wird ein Baufortschritt in z-Richtung von 24 mm/h (P 110 Formiga) und dem sehr guten Wert von 48 mm/h (P 396) angegeben. Es sind Wandstärken bis hinunter zu 0,6 mm sicher zu realisieren. Bei einem spezifischen Bauvolumen von 2 bis 20 mm³/s resultieren je nach Bauteil Baufortschritte von einem bis zu einigen Millimetern pro Stunde.

Post-Processing

Im Falle der Kunststoff-Sintermodelle entspricht die Nacharbeit dem in Abschnitt 3.2.1 „Maschinenspezifische Grundlagen“ beschriebenen, für das Lasersintern typischen Post-Processing.

EOS vertreibt eine Aupackstation, die an das Pulvermanagement angeschlossen werden kann.

Die Metallmodelle befinden sich nach Abschluss des Sintervorgangs in dem nahezu kalten Pulverbett, sodass lediglich das Pulver nach dem Hochfahren des Bauraums in den Pulverbehälter abgeführt werden muss. Die Bauplattform kann dann leicht vom Lift abgeschraubt werden. Je nach Werkstoff müssen Stützen manuell abgetrennt werden. Die Plattform ist anschließend zu glätten und sollte nach einigen Bauprozessen komplett überschleift werden. Sie kann direkt als Werkzeugträger weiterverwendet werden.

Prozesstypische Folgeverfahren

Es sind alle für das Lasersintern typischen Finishingtechniken und Abformverfahren möglich (vergleiche Abschnitt 3.2.1 „Maschinenspezifische Grundlagen“).

3.2.5 Laserschmelzen – ReaLizer GmbH

Selective Laser Melting (SLM)

ReaLizer SLM 50, ReaLizer SLM 100, ReaLizer SLM 125, ReaLizer SLM 250, ReaLizer SLM300, ReaLizer SLM300i

ReaLizer GmbH, Borcheln (Paderborn), Deutschland

Kurzbeschreibung

Additive Anlagen zum direkten Verschmelzen (Selective Laser Melting, SLM) von reinen Metall- und Keramikpulvern. Die Maschine arbeitet nach dem Laser-Scanner Prinzip.

Anwendungsbereich

Metalle: Funktionsbauteile, Werkzeugeinsätze

Keramiken: Werkzeugeinsätze

Entwicklungsstand

Kommerzialisiert seit 2002.

Historisches

Dr. Fockele und *Dr. Schwarze* gründeten 1990 eine Gesellschaft zur Entwicklung einer Stereolithographie-Anlage und 1992 die F&S-Stereolithographie-Technik GmbH. Ab 1995 entwickelten sie das SLM-Verfahren und stellten 1998 die SLM-ReaLizer vor. 2005 wurden die Entwicklungsarbeiten in der ReaLizer GmbH unter Leitung von *Dr. Fockele* konzentriert, der aktuell auch die Firma führt und die Fertigung und den Vertrieb der Anlagen übernimmt.

Strategien/Entwicklungspartner

F&S und das Fraunhofer Institut für Lasertechnik (FhG-ILT, Aachen) erarbeiteten gemeinsam die Basistechnologie *Laserschmelzen*. Eines der Hauptziele war die Verarbeitung der unterschiedlichen handelsüblichen Metallpulver. Eine strategische Partnerschaft zur Anwendung der Technologie auf Mikroteile gibt es mit dem Institut für Mikroverfahrenstechnik des Forschungszentrums Karlsruhe (IMVT-FZK).

Datenformate/Software

Es gibt eine gemeinsame Steuerungssoftware (für Windows XP) für die STL- und SLM-Realizer-Daten. Sie ermöglicht das Einlesen von STL- und Slice-Daten, die automatische Stützerzeugung, einfache CAD Funktionen, wie die Erzeugung von multiplen Offset-Strukturen und die Generierung von Schalenmodellen aus Slice-Daten sowie die Bauteileplatzierung. Die Software übernimmt zudem die komplette Maschinenkontrolle inklusive der Strahlweitenkompensation.

Prinzip der Schichtgenerierung

Das Laser-Scanner System arbeitet grundsätzlich wie in Abschnitt 3.2.1 „Maschinenspezifische Grundlagen“ beschrieben. Es werden Schichten von 20 bis 100 μm hergestellt.

Bauart/Konstruktion

Die *Realizer SLM300i* (Bild 3.41 (a)) basiert auf der Realizer SLM250/300 als gemeinsamer Technologiebasis. Sie ist mit einem im Infrarot emittierenden Faserlaser mit 200 W und bis zu 1 kW ausgestattet. Der Strahldurchmesser beträgt 30 bis 250 μm . Der Bauraum hat eine Größe von $x, y, z = 300 \times 300 \times 300 \text{ mm}$.

Die Maschine kann inertisiert werden. Für Anwendungen die eine verbesserte Fokussierung erfordern, ist optional ein Wechseloptikmodul erhältlich. Mit diesem Modul wird zwar das maximale Bauvolumen verringert, dafür lässt sich der Laserstrahl aber auf 20 μm fokussieren, um filigranere Strukturen mit hoher Oberflächenqualität herzustellen.

Die SLM 300i verfügt über ein System zum schnellen Pulverwechsel (Bild 3.41 (b)). Oft nicht kommuniziert, kann ein Wechsel des Baumaterials bei SLM-Maschinen im Allgemeinen und abhängig von der Materialfolge bis zu 1,5 Tage dauern. Durch einen Austausch eines vorkonfektionierten Behälters „Patronen-System“ kann bei der SLM 300i das aktuelle Pulver einfach aus der Maschine genommen und durch eine mit anderem Werkstoff gefüllte Patrone ersetzt werden. Beim Pulverwechsel muss nur noch der Bauraum gereinigt werden. Nach Herstellerangabe sollte ein Pulverwechsel dadurch nicht mehr länger als zwei Stunden dauern.



Bild 3.41 Realizer SLM 300i
(a) Außenansicht
(b) „Patronen-System“ zum schnellen Pulverwechsel
Quelle: Realizer GmbH



Bild 3.42 Realizer SLM 125
Quelle: Realizer GmbH

Realizer SLM125. Die Realizer SLM125 (Bild 3.42) ist eine kleinere, für den Bau filigraner Teile optimierte Maschine der Realizer GmbH. Sie verfügt über einen sehr schnellen digitalen Scanner. Der Bauraum misst $x, y, z = 125 \times 125 \times 200$ mm. Er ist vollständig gekapselt und erlaubt das Arbeiten mit Schutzgas und im Vakuum. Auch hochfeine Pulver können so risikolos verarbeitet werden. Die Realizer SLM 125 verfügt standardmäßig über einen 400 Watt-Faserlaser. Eine Pulverauffbereitungsanlage ist integriert. Diese sibt das Pulver schon während der Produktion und sorgt so für ein einfacheres Pulverhandling.

Die Maschine ist in Anbetracht ihrer Bauraumgröße sehr kompakt und passt auch in Labore. Sie orientiert sich an dem neuen an die SLM 50 (siehe nächster Absatz) angelehnten Design des Herstellers.

Realizer SLM50. Die Realizer SLM50 (Bild 3.43) gilt als die weltweit erste SLM-Desktop-Maschine. Sie besitzt sie einen runden Bauraum, dessen Plattformdurchmesser 70 mm und die maximalen Bauhöhe 40 mm beträgt. Der Laser besitzt eine Leistung bis maximal 120 W und ist abhängig von der verwendeten Optik auf einen Durchmesser zwischen 10 und 20 μm fokussierbar. Die SLM 50 wurde speziell für Anwendungen in der Dental- und Schmuckindustrie entwickelt. Ein besonderes Augenmerk richtete der Hersteller bei der Entwicklung der Anlage daher auf die



Bild 3.43 Realizer SLM 50 Desktopmaschine
Quelle: Realizer GmbH

Verarbeitbarkeit von Werkstoffen für diese Industrien, wie z. B. Kobalt-Chrom oder Gold. Eine weitere Besonderheit dieser Anlage stellt die Integration eines Stereomikroskops dar. Dieses eröffnet vielfältige Einsatzmöglichkeiten der SLM50-Anlage in Hochschulen und der Forschung.

Alle Maschinen liefern vollständig dichte Bauteile.

Material/Bauzeit/Genauigkeiten

Als Materialien werden handelsübliche Pulver mit Durchmessern von 10 bis 45 μm eingesetzt. Sie müssen runde Körner (gasverdüst) aufweisen, um entsprechend rollfähig zu sein und die Beschichtung zu ermöglichen. Die Pulver sollten keine Binder enthalten und eine nicht zu große Streubreite der Kornverteilung aufweisen. Es können Schichtdicken von 20 bis 100 μm gebaut werden, wobei in Anbetracht der Nacharbeit und bezüglich der Detaillierung geringe Schichtdicken zu bevorzugen sind. Das spezifische Bauvolumen wird mit 7 bis 30 cm^3/h angegeben.

Laut Hersteller sind Edelstähle (316L), Werkzeugstähle (1.2344), Kobalt-Chrom Stähle und Titan zu verarbeiten. Für den Werkzeugstahl 1.2344 werden eine Dichte von $> 99,8\%$ und eine Härte von > 52 HRC erreicht. Die Streckgrenze liegt um die 500 N/mm^2 , die Zugfestigkeit um die 600 N/mm^2 und die Bruchdehnung erreicht bis zu 30 %. Die Werte streuen, je nachdem ob die Proben in Schichtrichtung oder senkrecht dazu entnommen wurden. Bereits Ende 2006 wurden erste Aluminium-Bauteile vorgestellt. Die Prozessgrenzen liegen bei circa 80 μm dünnen Wänden, die mit 50 μm dünnen Schichten korrespondieren (Bild 3.44). Dazu sind sorgfältige Prozessoptimierungen notwendig.

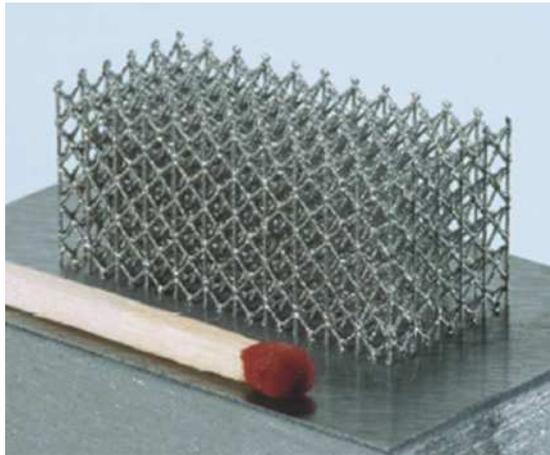


Bild 3.44 Selective Laser Melting, SLM – Mikrostruktur
Quelle: Realizer GmbH

Post-Processing

Es sind keine prozessbedingten Folgeverfahren wie Infiltration oder Wärmebehandlung notwendig. Das Bauteil kann wie jedes andere aus dem gleichen Material behandelt werden. Metallbauteile können spanend bearbeitet, erodiert, geschweißt und wärmebehandelt werden. Polieren bis zum Spiegelglanz ist möglich.

3.2.6 Laserschmelzen – SLM Solutions GmbH

Selective Laser Melting (SLM)

SLM[®] 125 HL, SLM[®] 280 HL, SLM[®] 500 HL,

SLM Solutions GmbH, Lübeck, Deutschland

Kurzbeschreibung

Die SLM Solutions GmbH bietet Laserschmelzanlagen nach dem SLM-Verfahren zur direkten Fertigung von Endprodukten an. Nach eigener Angabe waren die Maschinen des Unternehmens die ersten, welche in der Lage waren, reaktives Aluminiumpulver zu verarbeiten. Titanimplantate im Lasersinterverfahren wurden von ihr zuerst auf den Markt gebracht.

Anwendungsbereich

Endprodukte aus Metall.

Für Aufgaben im Rahmen der Forschung und Entwicklung gibt es darüber hinaus ein breites Programm, das weitere Qualitäten, aber auch Kupfer und Composites wie WC, TiC und CrC bietet.

Nach Herstellerangaben entstehen vollkommen dichte Bauteile aus den unterschiedlichsten Materialien, die die physikalisch-technologischen Eigenschaften von Serienteilen aufweisen sollen. Oberflächengüten von 12 bis 25 $\mu\text{m } R_A$ werden laut Hersteller nach Prozessabschluss erreicht. Die Auftragsraten werden mit 0,5 kg/h angegeben.

Die Hersteller geben an, dass aufgrund des Laserprozesses eine Kornverfeinerung des resultierenden Gefüges eintritt und bewirkt, dass sowohl die Zugfestigkeit als auch die Duktilität der mit LENS hergestellten Teile die Kennwerte der entsprechenden Materialien übertreffen [Kreicher98]. So erreicht der Stahl 316S mit dem LENS-Verfahren eine Zugfestigkeit von 500 MPa gegenüber 243 MPa bei nicht-additiver Verarbeitung. Diese Tendenz zeigt sich auch für Inconel 625 (584/403 MPa) und für Ti6Al4V (973/834 MPa), wobei die Bruchdehnungen mindestens um 10 % über den Vergleichswerten liegen und die erwartete Aufhärtung damit nicht eintritt. Der Hersteller gibt an, dass 0,08 mm große Details aufgelöst werden können und nennt eine Toleranz von $\pm 1/10$ mm bezogen auf das Fertigmaß. Der LENS-Prozess hat den grundsätzlichen Vorteil, dass Bauteile aus unterschiedlichen Materialien aufgebaut werden können. Es ist offensichtlich möglich, das Bauteil mit Stützen aus Kupfer zu versehen; sowohl nach außen als auch in Bezug auf interne Hohlräume. Nähere Angaben darüber gibt es nicht.

Post-Processing

Gegebenenfalls Entfernen der Stützen, materialspezifische Wärmebehandlung, Polieren. Prozessstypische Folgeverfahren.

3.3.3 Laser Metal Deposition (LMD), TRUMPF

TruLaser Cell 7040, TruLaser Cell 3000

TRUMPF Laser GmbH & Co. KG, Ditzingen, Deutschland

Die TrumaForm DMD 505 und der POM 5050 Direct Metal Fabricator (DM3D) waren baugleiche Maschinen, die aus der Partnerschaft von TRUMPF und POM entstanden sind. Inzwischen hat Trumpf die DM- Maschinen nicht mehr im Programm, liefert aber die gleiche oder ähnliche kundenspezifischen Konfigurationen auf Anfrage. POM hat die Aktivitäten in der DM3D Technology konzentriert und bietet Service und kundenspezifische Maschinenkonzepte an.

Nachfolgerin ist die TrueLaser Cell Familie.

Kurzbeschreibung

Die Anlagen arbeiten nach dem Laser Metal Deposition (LMD)-Verfahren (siehe Abschnitt 3.3.1 „Verfahrensprinzip“). Pulver aus den verschiedensten Metallen und Legierungen wird über Pulverdüsen lokal auf ein Werkstück aufgebracht. Es wird simultan mithilfe eines Lasers örtlich aufgeschmolzen und erstarrt durch Wärmeleitung in das Werkstück zu einer festen Schicht. Auf diese Weise wird zeilen- und schichtweise Material generiert und so ein Bauteil aufgebaut oder repariert. Der Prozess entspricht einem geregelten automatisierten Lasergenerieren.

Die als TruPrint bezeichnete Maschinenfamilie arbeitet nach dem Verfahren des direkten Laserschmelzens im Pulverbett (siehe Abschnitt 3.2.9 „Laser Metal Fusion (LMF) – TRUMPF“).

Anwendungsbereich

Rapid Manufacturing.

Entwicklungsstand

Kommerzialisiert seit 2003.

Historisches

TRUMPF (gegr. 1923) ist vor allem als Hersteller von Werkzeugmaschinen für die Blech- und Materialbearbeitung, von Laserstrahlquellen und von lasergestützten Bearbeitungsanlagen für die Industrie bekannt. TRUMPF liefert modular aufgebaute Komplettsysteme, die aus Strahlquellen und Handhabungsanlagen bestehen. Für Anwendungsfelder mit entsprechender Marktrelevanz werden Speziallösungen, z. B. Rohrschweißanlagen, angeboten. Entsprechend der Firmenhistorie steht die Maschinenteknik im Vordergrund.

Bereits 1999 wurde eine aus der Kooperation mit *Precision Optical Manufacturing*, POM, hervorgegangene Maschine zum automatisierten Laserbeschichten im geschlossenen Regelkreis, die POM 2400, vorgestellt. Das Verfahren wurde damals als Direct Metal Deposition (DMD) bezeichnet. Ab 2002 repräsentierte die Nachfolgemaschine POM DMD 5000 (mit einem 5 kW Laser) die zweite Generation. Sie wurde auch als *Direct Metal Fabricator* bezeichnet.

Strategien/Entwicklungspartner

Die strategische Zusammenarbeit zwischen POM und TRUMPF aus dem Jahr 2002 zielte vor allem auf die gemeinsame Nutzung des DMD-Patentes zum kontinuierlichen und automatischen Laserauftragen mit einem Pulverdüsen-Systeme über integrierte optische Sensoren. Es führte zur POM DMD 5050 (die auch als DMD 505 bezeichnet wird) und zur TrumaForm DMD 505. Beide werden heute so nicht mehr vertrieben (Details siehe Abschnitt 3.3.3 der 4. Auflage dieses Buches).

Im Zuge der Neuausrichtung von TRUMPF auf dem Gebiet der additiven Fertigung (3D-Drucken) wurden 2015 unter dem Namen TruLaser Cell auch überarbeitete Maschinen zur LMD-Technologie vorgestellt. Die kompaktere TruLaser Cell 3000 (Bild 3.59) und eine große Fünffachmaschine, die TruLaser Cell 7040 (Bild 3.60). Während die TruLaser Cell 7040 dem modularen TRUMPF Konzept folgt, ist die TruLaser Cell 3000 eher als stand alone-Maschine konzipiert.



Bild 3.59 TRUMPF Laser Metal Deposition (LMD), TruLaser Cell 3000
Quelle: TRUMPF



Bild 3.60 TRUMPF Laser Metal Deposition (LMD), TruLaser Cell 7040
Quelle: TRUMPF

Datenformate/Software

Die Anlage arbeitet mit dem TRUMPF 3D CAM Programmiersystem ToPs 800, also mit den 3D CNC Daten des jeweiligen Bauteils. Da zu reparierende Bauteile in den meisten Fällen vorher (und nachher) spanend bearbeitet werden, liegen diese Daten in der Regel vor. Alternativ wird über Teach-Verfahren direkt an der Maschine programmiert. Die Steuerung des Werkzeugweges (der Düse) ist in jedem Fall grundsätzlich bahnenorientiert. Die Maschine kann über das Internet adressiert werden.

Prinzip der Schichtgenerierung

Der Pulverwerkstoff wird über Pulverförderer koaxial zum Laserstrahl zugeführt, auf die Werkstückoberfläche aufgebracht und vollständig aufgeschmolzen. Das Schmelzbad erstarrt durch Wärmeleitung in das Bauteil. Jede Schicht wird bahngesteuert Zeile für Zeile aufgebracht. Es entstehen deshalb zwar Ansätze, aber keine Treppenstufen. Die einzelnen Bahnen haben eine Breite von circa 0,2 bis circa 1 mm und eine entsprechende Höhe. Damit sie eine Schicht bilden, werden sie definiert überlappt. Der Materialauftrag wird über die Geometrie des Schmelzbades durch 3 CCD-Kameras 3D überwacht und in Echtzeit im geschlossenen Wirkungskreis geregelt.

Bauart/Konstruktion

Die TruLaser Cell Serie 3000 verfügt über ein 5-Achsen-Bewegungssystem in einem abgeschlossenen Gehäuse. Sie weist drei Linearachsen (A, B, C) auf. Die Verfahrswege sind ($A = x$, $B = y$, $C = z$) $800 \times 600 \times 400$ mm. Zwei Drehachsen können um (B) $\pm 135^\circ$ und um (C) $\pm 360^\circ$ geschwenkt werden. Damit wird ein Arbeitsbereich von $600 \times 420 \times 520$ mm realisiert. Die Werkstücke können eine Dimension von bis zu 800×600 mm aufweisen.

Die Anlage ist auf eine maximale Laserleistung von 8 kW ausgelegt. Als Standard ist ein 5 kW CO₂-Laser anzusehen. Es steht aber die ganze Palette der TRUMPF-Laser zur Verfügung.

Die Maschine ist Teil des Trumpf Laser Cell Modulsystems und kann daher auch an Transfersysteme angebunden oder in die automatische Bestückung eingebunden werden. Dazu verfügt sie optional über schnelle automatische seitliche Hubtüren.

Die TruLaser Cell Serie 7000 basiert auf einer modular aufgebauten 5-Achsen-Bearbeitungsanlage für die Laser-Materialbearbeitung. Drei Linearachsen (A, B, C) mit Verfahrswegen von ($A = x$, $B = y$, $C = z$) $4000 \times (1500) 2000 \times 750$ mm und zwei Drehachsen, die um (B) $\pm 135^\circ$ und um (C) $\pm 360^\circ$ geschwenkt werden können, bilden ein 5-Achsen-Bewegungssystem. Verwendet werden CO₂-Laser mit Leistungen von 8 kW (Standard sind 5 kW) und Fokussdurchmessern um die 0,2 mm oder Festkörperlaser bis 6,6 kW. Der Bearbeitungskopf mit der Optik, der konzentrischen Pulverdüse und der Sensorik hängt über zwei Drehachsen an der z-Achse.

Dadurch entsteht ein sehr gut zugänglicher Bearbeitungsraum. Die Maschine ist vollständig eingehaust, kann aber bei offenen Türen betrieben und von drei Seiten beschickt werden. Sie erlaubt so die Bearbeitung von Bauteilen, die größer sind als der Bearbeitungsraum. Die Bearbeitung kann unter Schutzgas erfolgen. Die Maschine ist jedoch nicht vollständig abgeschlossen (sealed) und erlaubt daher nicht die Bearbeitung in einer zirkulierenden Schutzgasatmosphäre.

Der Einsatz von bis zu vier Pulverförderern ist auch softwareseitig vorgesehen. Die Pulverwerkstoffe können direkt in der Maschine gemischt werden.

Beide Maschinen sind Teil des Trumpf Laser Cell Modulsystems.

Material/Bauzeit/Genauigkeiten

Es können handelsübliche Einkomponenten-Metallpulver ohne Binder in einer typischen Körnung von 40 bis 105 μm (max. um 160 μm) eingesetzt werden. Typische Materialien sind Superlegierungen und Ni-Co-Cr-Al Systeme, Ni- und Co-Legierungen, Werkzeugstähle wie z. B. 1.2344 sowie WC Hartbeschichtungen. Aufgrund des vergleichsweise geringen Wärmeeintrags können vor allem rissempfindliche Werkstoffe wie Nickel-Basislegierungen (z. B. Inconel) hervorragend bearbeitet werden.

Klassische Materialauftragsraten betragen circa 150 cm^3/h . Herstellerseitig werden für die 7000er Serie bis zu 500 cm^3/h angegeben. Die Schichtdicken betragen meistens mehrere 1/10 mm bis wenige Millimeter, wobei eine Bearbeitungszugabe von etwa 0,2 mm für die Endbearbeitung durch Fräsen zu beachten ist. Dickere Schichten sind weniger aus technischen als vielmehr aus wirtschaftlichen Gründen seltener anzutreffen. In der Maschine ist eine Oberflächenqualität von 175 μm zu erreichen.

Eine Wärmebehandlung kann auch in der Maschine mit dem (defokussierten) Laser erfolgen.

Post-Processing

Die Bauteile können wärmebehandelt werden.

Prozesstypische Folgeverfahren

Die Bauteile werden üblicherweise spanend endbearbeitet.

schiedliche Anwendungen der Additiven Fertigung zur Herstellung von Werkzeugen und Formen vertikal zusammen (vergleiche Bild 1.6).

5.1.1 Direkte und indirekte Verfahren

Wenn die Werkzeuge direkt in der additiven Maschine entstehen, spricht man von direkten Verfahren, entstehen sie durch Abformen von direkt hergestellten Urmodellen in nachgeschalteten nicht-additiven Verfahrensschritten, nennt man sie indirekte Verfahren. Indirekte Verfahren sind überwiegend nicht-additiv und werden im Kontext der Additiven Fertigungstechnik nur behandelt, wenn sie mindestens einen Additiven Verfahrensschritt aufweisen. Es ist in den meisten Fällen der erste und führt auf das Urmodell.

Direkte Verfahren: Prototype Tooling und Direct Tooling

Wenn zur direkten Herstellung von Werkzeugen und Werkzeugeinsätzen Rapid Prototyping-Verfahren im Sinne des Functional Prototyping eingesetzt werden (Bild 1.6), führen sie je nach Anwendung auf Werkzeuge mit Prototypcharakter, die vorzugsweise aus Kunststoff bestehen. Man spricht dann von *Prototype Tooling* (Bild 5.1). *Prototype Tooling* ist eine Untermenge des Functional Prototyping.

Werden zur Werkzeugherstellung Rapid-Manufacturing-Verfahren (Bild 1.6) verwendet, so entstehen Werkzeuge oder Werkzeugeinsätze mit Seriencharakter (*Direct Tooling*), die vorzugsweise aus Metall bestehen. In diesem Fall spricht man von *Direct Tooling* (Bild 5.1). *Direct Tooling* ist ein Rapid Manufacturing Prozess.

Um den additiven Charakter zu unterstreichen und um sie von den indirekten Verfahren abzugrenzen, müssten die direkten Verfahren jeweils mit den Vorsatz *direkt* (oder *direct*) versehen werden, also *Direct Prototype Tooling* und *Direct Rapid Tooling* genannt werden. Das geschieht in der Praxis aber meistens nicht.

Indirekte Verfahren

Indirekte Verfahren oder *Indirect Tooling* (*indirektes Tooling*) werden auch *Folgeverfahren* oder Abformverfahren genannt. Sie sind nicht-additiv, gehören also nicht zu den *Additiven Fertigungsverfahren*. Aus zwei Gründen werden sie dennoch kurz besprochen. Zum einen, weil sie eng mit den Additiven Verfahren verwandt sind und mit der Herstellung des Urmodells immer einen ersten additiven Prozessschritt aufweisen. Zum anderen, um die Abgrenzung zu (direkten) Additiven Verfahren deutlich zu machen. Sprachlich findet eine Differenzierung meist nicht statt, weil indirekte Verfahren häufig nicht als *Indirect Tooling*, sondern ebenfalls als *Rapid Tooling* bezeichnet werden. Das geschieht in vielen Fällen bewusst und vor allem aus Gründen des Marketings. Die Bezeichnung eines Prozesses lässt daher meistens keinen Rückschluss darauf zu, ob es sich um ein Additives Verfahren handelt oder nicht.

Bridge Tooling

In der Praxis gibt es Anwendungen des Prototype Tooling, die nicht auf Prototypformteile führen, sondern auf kleine Stückzahlen von Formteilen mit Seriencharakter. Weil das *Prototype Tooling* auf diese Weise die Kluft zu den serientauglichen Direct Tooling-Verfahren überbrückt, nennt man diese Untermenge der Prototype Tooling-Verfahren auch *Bridge Tooling*. Bridge Tools können direkt additiv gefertigt sein, sie können aber auch das Resultat von Abformverfahren sein. Die Bezeichnung *Bridge Tool* wird allerdings auch für Nicht-additive Verfahren gewählt, wenn sie die gleiche Funktion haben.

Die Zusammenhänge sind in Bild 5.1 (einem detaillierten Ausschnitt aus Bild 1.6) dargestellt. Darin wird nochmals deutlich, dass *Rapid Tooling* keine horizontale technologische Gliederung der *Additiven Fertigungsverfahren* bezeichnet, sondern im Sinne einer vertikalen Gliederung unterschiedliche Anwendungen zur Herstellung von Werkzeugen und Werkzeugeinsätzen thematisch zusammenfasst. Bild 5.1 zeigt auch, dass das Indirekte Tooling auf Basis des Functional Prototyping je nach Verfahren und weiterer Bearbeitung entweder auf reine Prototypwerkzeuge oder auf Werkzeuge mit dem Charakter von Bridge Tools führen kann. Die Bezeichnungen müssten korrekt jeweils mit dem Vorsatz „indirektes ...“ versehen werden. Das ist in Bild 5.1 auch geschehen, wird aber im allgemeinen Sprachgebrauch meistens weggelassen.

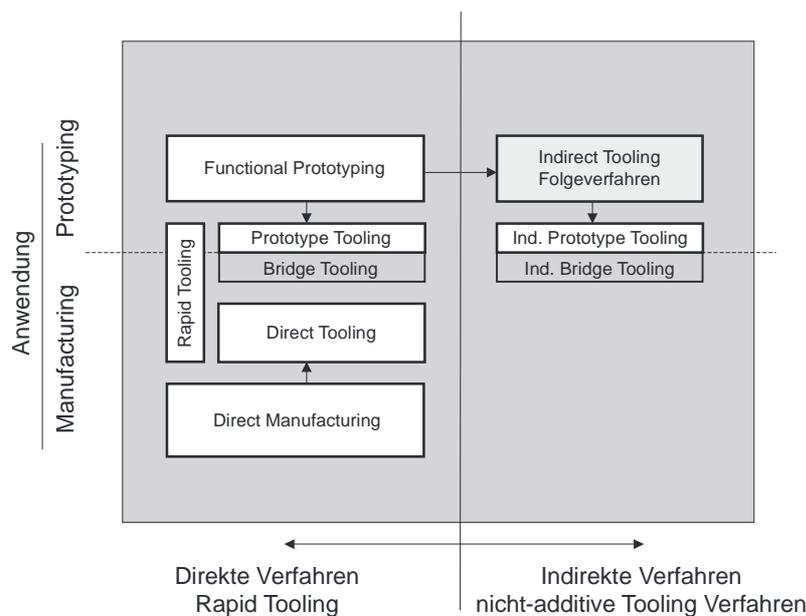


Bild 5.1 Struktur des Rapid Tooling im Kontext der additiven Fertigungsverfahren Functional Prototyping und Direct Manufacturing

■ 5.2 Eigenschaften additiv gefertigter Werkzeuge

Additiv gefertigte Werkzeuge unterscheiden sich sowohl im strategischen Ansatz als auch in der konkreten Herstelltechnik von nicht-additiven, sogenannten konventionellen Werkzeugen.

Trotz der Bezeichnung additiv gefertigte Werkzeuge werden in der Praxis vorzugsweise Werkzeugeinsätze gefertigt und mit Normalien und abtragenden Verfahren komplettiert. Rapid Tooling führt nur in Ausnahmefällen zu vollständigen Werkzeugen.

5.2.1 Strategische Aspekte beim Einsatz Additiver Werkzeuge

Mit der additiven Herstellung von Werkzeugen und Werkzeugeinsätzen werden vor allem die Ziele verknüpft, den Herstellprozess zu beschleunigen und neue technische Konzepte zu realisieren.

Das Kriterium Schnelligkeit führt meistens auf das Prototype Tooling und damit zu nicht metallenen Werkzeugen, die vorzugsweise durch Abformung von additiv gefertigten Urmodellen oder direkt aus additiven Kunststoffprozessen entstehen.

Die Produktion von serientauglichen Bauteilen oder die Umsetzung neuer technischer Konzepte geschieht mit Verfahren des Direct Tooling und damit ausschließlich mit additiven Metall- oder Keramikprozessen.

5.2.1.1 Schnelligkeit

Der entscheidende Fortschritt, der den Additiven Verfahren auch Ihren Namenszusatz *Rapid* beschert hat, bestand zunächst darin, komplexe Formteile aus Kunststoff unter Umgehung von Werkzeugen und damit um viele Wochen schneller und zudem preisgünstiger zu erhalten, als das bis dato (Ende der 1980er-Jahre) möglich war.

Schon Anfang der 1990er-Jahre begann man aber, die neuen Verfahren auch für die Herstellung von Werkzeugen und Werkzeugeinsätzen zu nutzen, die man eigentlich zukünftig durch den Einsatz Additiver Verfahren vermeiden wollte.

Das lag vor allem an den unzureichenden Materialeigenschaften der damaligen additiven Bauteile und an der Tatsache, dass die Additive Fertigung von größeren Stückzahlen rasch sehr teuer wird, weil keine nennenswerte Kostendegression eintritt, so wie das bei der Spritzgießfertigung der Fall ist.

Man entwickelte deshalb Verfahren und Verfahrensketten zur direkten und indirekten Herstellung additiver Werkzeuge und Werkzeugeinsätze. Dem Ziel, schnell Formteile zu erhalten und dafür sehr schnell ein Werkzeug herzustellen, wurden

andere Anforderungen untergeordnet. So war und ist man bereit, die Qualität des Finishings der Bauteile zu relativieren und beispielsweise Blankstellen oder Einfallstellen zu tolerieren. Auch akzeptierte man eine geringere Ausbringungsmenge, deutlich längere Zykluszeiten und gegebenenfalls auch manuell zu handhabende Losteile anstelle von Schiebern.

Um das primäre Ziel, die Schnelligkeit, zu gewährleisten, werden als Ausgangsbasis Additive Verfahren zur Herstellung von Kunststoffbauteilen gewählt. Der Weg zum Werkzeug führt dann entweder direkt zu Prototypwerkzeugen oder Bridge Tools oder über Folgeverfahren zu entsprechenden indirekt hergestellten Werkzeugen oder Formeinsätzen (Bild 5.1).

5.2.1.2 Umsetzung neuer technischer Konzepte

Auf der Suche nach Alleinstellungsmerkmalen wurden schon frühzeitig zwei Gruppen von Anwendungen definiert, die neue technische Aspekte beleuchten: Die konturangepasste Kühlung (Conformal Cooling) und die Variation des Werkstoffs über dem Bauteilquerschnitt (graded Materials) bezogen auf das Werkzeug. Beide Ansätze unterstützen eine effektive Temperierung von Spritzgießwerkzeugen und zielen sowohl auf Qualitätsverbesserungen durch eine gleichmäßigere Temperaturverteilung als auch auf Kostenvorteile durch kürzere Zykluszeiten. Sie sind beide direkt mit Metallwerkzeugen in Serienqualität verknüpft.

Die Geometriefreiheit ermöglicht die Fertigung interner Hohlräume, die als räumlich gekrümmte Kanäle oder Netze dem Konturverlauf folgend dicht unter die Oberfläche der Kavität gelegt werden können und so eine vor allem viel schnellere Temperierung erlauben (Bild 5.2). Ungleichmäßige Temperaturverteilungen und lokale

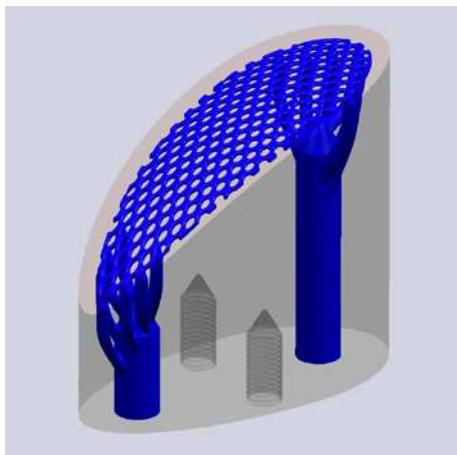


Bild 5.2 Konturangepasste Kühlung: CAD-Konstruktion eines Kühlnetzes
Quelle: Concept Laser GmbH/ Hofmann



Bild 5.3 Melato. Werkzeugeinsatz aus Stahl und Kupfer. CAD-Konstruktion (ganz links und links), endbearbeitetes Werkzeug (ganz rechts) und aufgeschnittener Einsatz mit Blick auf die Kühlzone (rechts)

Quelle: A. Techel, Fraunhofer-Institut für Werkzeug- und Stahltechnik/ rtejournal

Überhitzungen, sogenannte Hotspots, können gezielt vermieden werden. Derartige interne Hohlräume können auch zur Realisierung von Luftauswerfern verwendet werden, die angesichts der mit Kühlstrukturen durchzogenen Kavitäten zunehmend als Alternative zu den gebohrten Auswerferkanälen mit geraden Auswerfern in Betracht gezogen werden.

Additive Verfahren, vor allem das Schicht-Laminat-Verfahren, Abschnitt 3.4 „Schicht-Laminat-Verfahren – Layer Laminate Manufacturing (LLM)“ mit Metallfolien, aber auch das Beschichten mit der Pulverdüse, Abschnitt 3.3 „Beschichten – Schmelzen mit der Pulverdüse“, oder, wenn man sich perspektivisch die Variation der Pulverqualität während des Beschichtens vorstellt, auch das Metallsintern oder -schmelzen, Abschnitt 3.2 „Sintern/Selektives Sintern – Schmelzen im Pulverbett“, eröffnen die Möglichkeit, vor allem unterschiedlich stark wärmeleitende Materialien gezielt zu verarbeiten, um eine definiert verbesserte Temperierung zu erzielen.

Die Variation der Werkstoffeigenschaften über dem Bauteilquerschnitt ist im Ansatz bei dem sogenannten Metallfolien LOM oder Metal Laminated Tooling, MELATO, Abschnitt 3.4.10.1 „Bauteile aus Metalllamellen – Laminated Metal Prototyping“, mit unterschiedlichen Materialien umgesetzt. Das Beispiel auf Bild 5.3 zeigt einen innen gekühlten Formeinsatz aus Stahl, der zusätzlich in der thermisch kritischen Zone einen Einsatz aus Kupfer aufweist. Bild 5.3 zeigt die CAD-Konstruktion und das endbearbeitete, für das Foto geschnittene, Werkzeug.

5.2.2 Konstruktive Eigenschaften additiv gefertigter Werkzeuge

Die strategischen Überlegungen schlagen sich direkt in der Konstruktion von additiv gefertigten Werkzeugen und Werkzeugeinsätzen nieder.

Schnelle Verfahren stützen sich auf das Abgießen von schnell verfügbaren additiv gefertigten Urmodellen. Die dazu verwendeten weichen oder harten Formmassen

führen auf Prototypwerkzeuge mit entsprechend charakteristischen konstruktiven Eigenschaften.

Neue technologische Ansätze wie die konturangepasste Kühlung werden mit direkt hergestellten serientauglichen Werkzeugen und Werkzeugeinsätzen kombiniert. Sie werden in der Serienfertigung eingesetzt.

5.2.2.1 Prototypwerkzeuge

Prototypwerkzeuge basieren auf dem Prinzip der Trennung der Eigenschaften. Ausgangspunkt sind schnell verfügbare und geometrisch exakte additiv gefertigte (Rapid Prototyping) Urmodelle. Sie werden mittels unterschiedlicher Gießverfahren abgeformt. Nach der Entformung bilden die Formmassen mit der darin liegenden Kavität das Werkzeug.

Die eingesetzten Abform- oder Folgeprozesse sind alle nicht neu. Sie sind selbst nicht-additiv und auch nicht exklusiv für additiv gefertigte Bauteile anwendbar.

5.2.2.1.1 Weiche gegossene Werkzeuge

Abformverfahren führen häufig auf weiche Werkzeuge aus Silikon oder Kautschuk. Eine CAD-gestützte Werkzeugkonstruktion ist dafür nicht erforderlich und auch gar nicht einfach möglich. Die Werkzeugkonzeption geschieht manuell. Die Trennebenen werden mittels transparenten Klebestreifen am Modell festgelegt, Angüsse und Steiger in Form von Stangen und Drähten angebracht, das so vorbereitete Modell in einen Gießrahmen positioniert und mit der Formmasse umgossen. Nach der Verfestigung wird die ausgehärtete Formmasse an der Trennebene per Hand mit dem Skalpell aufgeschnitten und das Modell entnommen. Die Form wird mit Trennmittel eingesprüht, geschlossen, gegen Öffnen gesichert und vorzugsweise in einer Vakuumkammer ausgegossen. Der Gießvorgang ist semi-manuell. Verwendet werden vergießbare Duroplaste, sogenannte Gießharze, also vorzugsweise Polyurethane (PUR).

Weil die Formen weich sind, sind keine Entformungsschrägen erforderlich. Es können sogar leichte Hinterschnitte zwangsentformt werden. Die Elastizität bringt aber auch Einbußen bei der Dimensionstabilität und der Maßgenauigkeit mit sich. Große Formen verformen sich unter ihrem Eigengewicht und werden deshalb durch Einleger ausgesteift. Der weiche Formstoff hat einen recht hohen Abrieb, wodurch die Ausbringungsmenge auf circa 15 bis 20 Abgüsse pro Form limitiert wird. Feine Details, z. B. wenn sie durch freistehende Dome charakterisiert sind, können leicht abreißen, weshalb die genannte Ausbringungsmenge stark von der Geometrie abhängt. Je nach Gießharz und Formstoff führen chemische Wechselwirkungen zu Oberflächenfehlern oder zum Formverschleiß durch Risse, Materialaufhärtungen und -ausbrüchen. Starke Hinterschnitte können durch Loseile oder mehrfach geteilte

Formen realisiert werden, erhöhen aber die Komplexität der Form. In die Formen können Einleger z. B. aus Metall eingebracht und umgossen werden. Die Zykluszeiten sind mit ein bis zwei Stunden recht lang.

Die Formen werden für den Abguss vorgewärmt. Dieser Vorwärmprozess kann auch zur Fein-Skalierung zumindest von einer Hauptabmessung genutzt werden, weil z. B. Silikone im Temperaturbereich um 70 °C ein nahezu lineares Ausdehnungsverhalten haben.

5.2.2.1.2 Harte gegossene Werkzeuge

Harte Werkzeuge entstehen, wenn die Abformmasse vollständig aushärtet, was z. B. bei aluminiumgefülltem Epoxidharz der Fall ist. Für harte Werkzeuge ist eine vollständige CAD-Werkzeugkonstruktion erforderlich. Sie umfasst vor allem die Festlegung der Trennebenen, die Einbringung der Entformungsschrägen, die Dimensionierung des Angussystems und der Auswerfer sowie die Definition eventuell notwendiger Losteile. Auf Schieber wird aus Gründen des einfachen Werkzeugaufbaus üblicherweise verzichtet. Wenn sie nicht zu umgehen sind, werden sie als Losteile gefräst, an das Urmodell anmodelliert und mit eingegossen. Die Werkzeuge sind vorzugsweise ungekühlt. Das Eingießen von Kühlleitungen ist aber leicht möglich. Harte Werkzeuge müssen, jede Formhälfte für sich, auf Formplatten aufgebaut und einzeln abgegossen werden.

Harte gegossene Werkzeuge werden vorzugsweise als Formhälften in Stammrahmen eingebracht und die Formteile auf Spritzgießmaschinen hergestellt. Der wesentlich aufwendigeren Werkzeugherstellung als bei weichen Werkzeugen steht der Vorteil gegenüber, dass die Formteile aus serientauglichen thermoplastischen Kunststoffen gefertigt werden können. Die Ausbringungsmengen sind zudem höher und erreichen je nach Geometrie und Material mehrere 10.000 Stück. Die Zykluszeiten liegen im Minutenbereich. Sie werden länger, wenn mehrere Losteile per Hand entformt und eingesetzt werden müssen.

5.2.2.1.3 Harte direkt gefertigte Werkzeuge und Werkzeugeinsätze

Die direkte Herstellung von einsatzfähigen Werkzeugen und Werkzeugeinsätzen basiert auf der additiven Verarbeitung von werkzeugtauglichen Metallen oder Keramiken direkt in der Maschine. Eine vollständige CAD-Werkzeugkonstruktion ist eine zwingende Voraussetzung für den Bau harter Werkzeuge. Die Bauteile sollten mindestens die Genauigkeiten und Oberflächenqualitäten aufweisen, die Nicht-additive Verfahren im Werkzeugbau auch aufweisen. Damit gelten natürlich die Parameter für Serienwerkzeuge. Diese Ziele werden heute (2016) direkt im Prozess noch nicht erreicht. Allerdings gilt das für den konventionellen Werkzeugbau genauso. Spanend hergestellte Elemente werden durch Erodieren und automatisches und manuelles Polieren nachbearbeitet oder ergänzt.

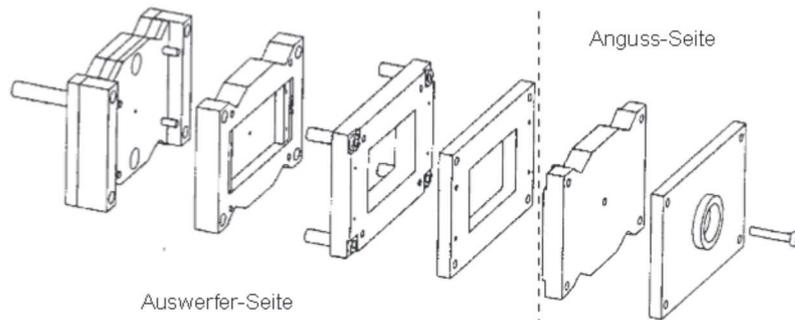


Bild 5.4 Prinzipieller Aufbau eines Stahlstammwerkzeuges für die Kunststoffspritzgießfertigung, Explosionsdarstellung

Die aktuellen Entwicklungen bei den Additiven Verfahren tragen aber kontinuierlich dazu bei, die Oberflächen zu verbessern. Im Prozess geschieht das vor allem durch optimierte Belichtungsstrategien und geschlossene Regelalgorithmen, die auf Messungen des Temperaturfeldes in der Bauebene und auf der Erfassung der Ist-Geometrie durch Kameras in der Prozesskammer basieren.

Die Additive Fertigung ist nach wie vor nur für Bauteile sinnvoll, die nicht oder nicht so gut konventionell hergestellt werden können.

Grundsätzlich sollten alle Werkzeugelemente, die spanend hergestellt werden können, auch spanend hergestellt werden. Auch Komponenten, die als Normalie oder als Halbzeug mit Normaliencharakter zugekauft werden können, sollten keinesfalls additiv gefertigt werden. Bild 5.4 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines typischen Stahlstammwerkzeuges [Lucke95] für den Kunststoffspritzguss. Das eigentliche Werkzeug besteht danach im Wesentlichen aus Normalien, in die die nicht gezeichnete additiv gefertigte Kavität eingesetzt wird.

Auf Bild 5.5 ist ein modular aufgebautes Demonstrationswerkzeug zu sehen. Die Platten bestehen zur Verdeutlichung des Aufbaus aus Plexiglas. Die als Normalien zugekauften Führungen, Federn, Auswerfer und der Düsenstock sind als Originale eingearbeitet und gut zu erkennen. Im Zentrum sieht man beide Hälften des additiv gefertigten Formeinsatzes (Kavität). Vor dem Werkzeug ist das Formteil in Vorder- und Rückansicht zu sehen.

In der Praxis ist es sinnvoll, additiv und konventionell gefertigte Elemente zu kombinieren, indem man additiv auf einer zugekauften Normalie aufbaut. Einige additive Metallmaschinen unterstützen dies, bei Concept Laser (Abschnitt 3.2.8 „LaserCusing – Concept Laser GmbH“) ist es Teil der Strategie.

Es ist offensichtlich, dass die direkte additive Herstellung von Werkzeugen eine umfangreiche Werkzeugkonstruktion voraussetzt, wie sie im Serienwerkzeugbau üblich ist. Additiv werden vorzugsweise Kavitäten oder Element davon gefertigt, keinesfalls ganze Werkzeughälften, wie das bei den gegossenen Werkzeugen der Fall ist.



Bild 5.5 Prinzipieller Aufbau eines Spritzgießwerkzeugs Die Platten wurden zur Demonstration aus Plexiglas gefertigt.
Quelle: 3D Systems

Heutige additiv gefertigte Werkzeuge müssen Eigenschaften aufweisen, die mit Nicht-additiven Verfahren nicht zu erzielen sind. Dazu gehören die konstruktive Umsetzung des Prinzips der konturangepassten Kühlung (Abschnitt 5.2.1.2 „Umsetzung neuer technischer Konzepte“ sowie die Bilder 5.2 und 5.3) und die Integration unterschiedlicher Materialien in ein Werkzeug. Mit Temperierkanälen oder -netzen ausgestattete Werkzeuge sind wesentlich weniger massiv als traditionell ausgelegte Werkzeuge. Ein Festigkeitsnachweis mittels FEM-Simulation und selbstverständlich eine Füllsimulation sind deshalb Bestandteil der Werkzeugauslegung und Konstruktion.

5.2.2.2 Bereitstellung der Daten

Weiche abgegossene Werkzeuge benötigen lediglich ein additiv gefertigtes Urmodell. Der Datenweg zu dessen Herstellung entspricht dem von Bild 2.6.

Harte Werkzeuge erfordern eine Werkzeugkonstruktion. Deshalb muss der Datenweg für das Rapid Tooling von harten gegossenen oder direkt hergestellten Werkzeugen und Werkzeugeinsätzen gegenüber dem prinzipiellen Datenweg nach Bild 2.6 modifiziert werden (Bild 5.6).

Während beim Rapid Prototyping das additive Bauteil als Faksimile des 3D-Datensatzes aufgefasst werden konnte, weil das additive Bauteil und der CAD-Datensatz idealerweise identisch sind, unterscheiden sich die Geometrie des Werkzeugs und des Formteils grundsätzlich und mitunter erheblich voneinander. Der eigentlichen CAD-Konstruktion des Zielteils nachgeschaltet, aber mit dieser inhaltlich stark

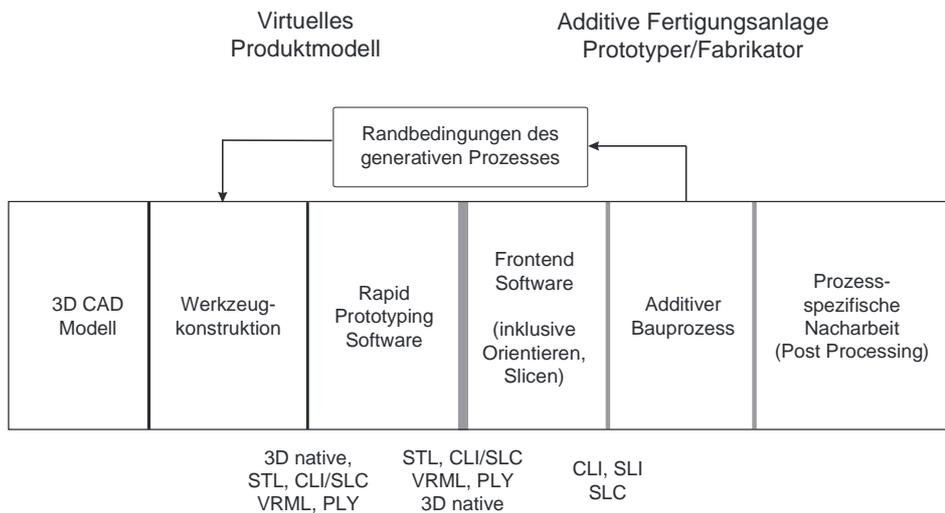


Bild 5.6 Gegenüber Bild 2.6 modifizierter Datenweg für das Rapid Tooling

vernetzt, muss eine Werkzeugkonstruktion erfolgen. Beides kann aber nicht mehr ohne Berücksichtigung des späteren additiven Prozesses erfolgen. Die Orientierung im Bauraum ist entscheidend, wenn beispielsweise unterschiedliche Materialien verwendet werden oder Stufen die Rundheit der Kanäle oder ihre Rauigkeit, also die Strömungsverhältnisse, beeinflussen. Auch der Aufwand der spanenden Nacharbeit, z. B. bei der Herstellung von Systembohrungen z. B. für Auswerfer oder Düsen kann davon abhängen. Grundsätzlich hat sich bewährt, das Bauteil senkrecht zur Entformungsrichtung zu fertigen. Bei der Werkzeugkonstruktion muss daher das später verwendete Additive Verfahren bereits ausgewählt sein und von ihm ausgehende Randbedingungen müssen in die Werkzeugkonstruktion einfließen.

■ 5.3 Indirekte Rapid Tooling-Verfahren – Abformverfahren und Folgeprozesse

Indirekte Verfahren sind nicht zwingend mit additiven Prozessen gekoppelt, sondern in gleichem Maße mit nicht-additiv gefertigten Urmodellen umzusetzen. Einen Vorteil bieten sie nur, wenn die additiv gefertigten Urmodelle den Prozess insgesamt schneller, qualitativ hochwertiger oder sogar überhaupt erst möglich machen. Der Betrachtung der indirekten Rapid Tooling-Verfahren muss deshalb eine Diskussion der Eignung der unterschiedlichen Rapid Prototyping-Verfahren für die Herstellung der Urmodelle vorausgeschickt werden.

5.3.1 Eignung Additiver Verfahren zur Herstellung von Urmodellen für Folgeprozesse

Urmodelle müssen mindestens alle Details aufweisen, die im späteren Formteil zu sehen sein sollen. Das gleiche gilt für die Struktur der Oberfläche. An sie werden aus Gründen der Entformbarkeit und des Formverschleißes darüber hinaus grundsätzlich höchste Anforderungen gestellt. Um Abformungen zu ermöglichen, müssen Urmodelle Festigkeiten aufweisen, die die Entformkräfte sicher aufnehmen. Die Details dürfen deshalb auch nicht zu fein sein. Bei harten Werkzeugen dürfen keine, bei weichen allenfalls geringe Hinterschnitte auftreten. Stufen entgegen der Entformungsrichtung sind zu vermeiden.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, ist bei allen Verfahren ein sorgfältiges Nacharbeiten der Oberflächen, meist durch Schleifen, notwendig. Poröse Modelle, z. B. Sinter- oder 3D Printing-Modelle, werden vor der Abformung infiltriert und in der Regel zusätzlich lackiert. Für gezielte Oberflächeneffekte werden auch Strukturlacke aufgebracht. Es ist darauf zu achten, dass diese Arbeiten die Geometrie nicht verändern.

Bei allen Verfahren ist die Verträglichkeit der Materialien der additiv gefertigten Urmodelle mit denen der Formenmaterialien zu überprüfen. Das gilt insbesondere auch in Hinblick auf Füller und Lacke.

Die unterschiedlichen Additiven Verfahren sind entsprechend unterschiedlich gut für Folgeverfahren geeignet:

Polymerisation. Wegen der hohen Detaillierung und der guten Oberflächen direkt aus dem Prozess sind Polymerisationsverfahren grundsätzlich gut geeignet. Sie sind die vorwiegend für das Abformen eingesetzten additiven Prozesse. Die Nacharbeit ist wegen der weichen Oberflächen relativ einfach. Verfahren ohne Stützen oder solche, bei denen die Stützen ausgewaschen werden, sind bei internen Hohlräumen wie Strömungskanälen von Vorteil.

Bei der Anwendung von Reaktionsharzen ist die Wärmeentwicklung zu berücksichtigen. Insbesondere bei Polymerwerkstoffen mit niedrigen Glasübergangstemperaturen können feine Details erweichen oder angeschmolzen werden.

Sintern (von Kunststoffen). Die Oberflächengüte ist durch Füllern zu verbessern. Das Infiltrieren der porösen Bauteile wird angeraten. Die für das Vakuum-Tiefziehen von Kunststofffolien notwendige definierte Porosität der Form kann prozesseitig eingestellt werden.

3D Printing/Pulver-Binder-Verfahren. Zur Überwindung der Entformkräfte ist eine Steigerung der Festigkeit mittels Infiltration notwendig. Zudem ist eine umfangreiche Nacharbeit zur Erzielung der geforderten Oberflächengüte unumgänglich. Angesichts dieses Aufwandes sind 3D Printing-Verfahren für Abformprozesse weniger geeignet.

Davon ausgenommen sind verlorene Gussformen für den Metallfeinguss, für die es spezielle Baustrategien gibt, z. B. Z-Cast von 3D Systems, Abschnitt 3.6.2 „3D Printer – 3D Systems/Z-Corporation“ oder DSPC von Soligen, Abschnitt 3.6.4 „Direct Shell Production Casting (DSPC) – Soligen“.

Vollständig auswaschbare Modelle für die Herstellung von Bauteilen mit internen Hohlräumen entstehen bei geeigneten Bauparametern und wenn die Infiltration bewusst unterbleibt. Dann wird die Handhabung aufgrund der geringen Festigkeit aber sehr aufwendig.

Schicht-Laminat-Verfahren. Das Infiltrieren gegen das Delaminieren der Schichten und eine Lackierung sind notwendig. Freistehende Wände mit Wandstärken unter 0,5 mm und Aspektverhältnissen über 10 sind in Anbetracht der Entformungskräfte kaum zu realisieren. Die Nacharbeit ist insgesamt aufwendig.

Fused Layer Modeling oder Extrusionsverfahren. Die typische Oberflächenstruktur erfordert in aller Regel ein sehr aufwendiges Füllern und Schleifen. FLM-Verfahren sind daher als Urmodelle für Folgeverfahren kaum von industrieller Bedeutung.

Extrusionsverfahren, die direkt Wachsmodele herstellen, sind hingegen vor allem für den Feingussprozess sehr gut geeignet.

Die Folge- oder Abformprozesse werden unterschieden in solche, die Kunststoffbauteile zum Ziel (Abschnitt 5.3.2 „Indirekte Verfahren zur Herstellung von Werkzeugen für Kunststoffbauteile“) haben und solche, die zur Herstellung von Metall- (Abschnitt 5.3.3 „Indirekte Verfahren zur Herstellung von Metallbauteilen“) und, heute noch von geringerer Bedeutung, Keramikbauteilen eingesetzt werden.

Im Rahmen des Prototype Toolings werden vor allem indirekte Verfahren für Werkzeuge zur Herstellung von Kunststoffformteilen gefertigt.

Metallene Werkzeuge entstehen mit Direct Tooling-Verfahren.

Abformprozesse zur Herstellung von Metallbauteilen sind vorzugsweise mit Gießprozessen, vor allem mit dem Feingussprozess verknüpft und verwenden direkt oder über Zwischenprozesse hergestellte Wachs- oder ausschmelzbare Modelle (Abschnitt 5.3.3 „Indirekte Verfahren zur Herstellung von Metallbauteilen“).

5.3.2 Indirekte Verfahren zur Herstellung von Werkzeugen für Kunststoffbauteile

Die gebräuchlichsten nicht-additiven Folgeverfahren zur Herstellung von Kunststoffbauteilen auf der Basis von additiven Urmodellen gliedert man nach den Eigenschaften der Werkzeuge. Abgegossen werden weiche oder harte Werkzeuge. Die dazu gehörenden Verfahren sind:

Weiche Werkzeuge oder Formen

 Vakuumgießen,

 Nylongießen,

 Silikonabguss,

 Photocasting,

 Spincasting.

Harte Werkzeuge und Werkzeugeinsätze

 Gießharzwerkzeuge,

 Maskenwerkzeuge (Polyurethangießen).

Alle Verfahren sind nicht-additiv und werden daher nachstehend nur kurz beschrieben, um sie in den Zusammenhang mit additiv gefertigten Urmodellen zu stellen.

Die größte technische Bedeutung haben weiche Werkzeuge für das Vakuumgießen (engl. Room Temperature Vulcanization, RTV, oder auch Silicon Transfer Molding). Gefertigt werden Prototypen und Kleinstserien. Für harte Werkzeuge ist das Spritzgießen (Kunststoffspritzguss) von thermoplastischen Formteilen die wichtigste Anwendung.

Während das Vakuumgießen zur Herstellung von Prototypen aber auch häufig zur Fertigung von Endprodukten eingesetzt wird, dienen gegossene harte Spritzgießwerkzeuge in den meisten Fällen nur zur Herstellung von Prototypen und Kleinstserien mit dem Charakter von Endprodukten.

5.3.2.1 Abgießen in weiche Werkzeuge oder Formen

Weiche Werkzeuge aus Silikon oder Kautschukmasse werden beim Vakuumgießen, Nylongießen, Silikonabguss, Photocasting und Spincasting verwendet. Den Verfahren gemeinsam ist, dass ein Urmodell in ein Werkzeug abgeformt wird, das in der Regel aus zwei Formhälften besteht. Bei großen Hinterschnitten können auch kompliziertere Werkzeugkonstruktionen mit Losteilen notwendig werden.

5.3.2.1.1 Vakuumgießen

Das *Vakuumgießen* ist das wichtigste Abformverfahren in der Prototypen- und der spezialisierten Kleinserienfertigung. Die Bauteile entstehen durch Vergießen von 2-Komponenten Polyurethan ((PUR oder auch PU) Harzen in einem Silikonwerkzeug unter Vakuum. Der Vorteil des Gießens unter Vakuum besteht in der gleichmäßigen Füllung der Form und der Vermeidung von Fehlstellen durch Blasen. Hergestellt werden auch sehr kleine Bauteile (z. B. in der Schmuckindustrie) und sehr große Bauteile (z. B. Kfz-Frontschürzen, Bild 5.7).



Bild 5.7 Frontschürze. Vakuumgießen und Finishing
Quelle: CP-GmbH

Die besonderen Vorteile des Vakuumgießens liegen darin, dass für das Werkzeug keine CAD-Werkzeugkonstruktion notwendig ist und dass sich die Silikonformen im Temperaturbereich um die 70 °C nahezu linear mit der Temperatur ausdehnen und somit skalierbar sind, was auch zum Ausgleich des Schwundes benutzt werden kann. Die Bauteile können deshalb durch Temperieren zumindest in einer Vorzugsrichtung genau den Anforderungen angepasst werden.

Die Herstellung der Form erfolgt wie unter *weiche gegossene Werkzeuge*, Abschnitt 5.2.2.1 „Prototypwerkzeuge“, besprochen. Das additiv gefertigte Urmodell wird beim Abformen häufig beschädigt. Wenn es unversehrt bleibt, können zur Herstellung größerer Serien weitere Formen angefertigt werden.

Die Zykluszeit, die Herstellzeit für ein Bauteil, liegt je nach Geometrie und Größe des Bauteils bei einer halben bis über einer Stunde. Dabei dauert das eigentliche Gießen nur circa vier bis acht Minuten, die Aushärtung in der circa 60 °C warmen Form erfolgt in einem Wärmeofen und ist in bis zu einer Stunde abgeschlossen; das Bauteil kann entformt werden. Je nach Vakuumgießwerkstoff und Komplexität der Form können zehn bis dreißig, in Ausnahmefällen auch bis zu 50 Teile aus einer Form gefertigt werden. Bei komplexen Geometrien geht man im Mittel von 15 Abgüssen pro Silikonform aus. Die absolute Ausbringungsmenge wird daher wesentlich von wirtschaftlichen Kriterien begrenzt.

Zur Fertigung werden manuelle und automatische Gießkammern in unterschiedlichen Größen angeboten. Industrielle Modelle (z. B. Bild 5.8 oben) mischen die Komponenten des Gießharzes automatisch und füllen sie über einen Trichter und einen Anguss Schlauch in die darunter liegende Form (Bild 5.8 unten). Im unteren Teil der Vakuumkammer befindet sich während des Gießvorgangs die Silikonform.