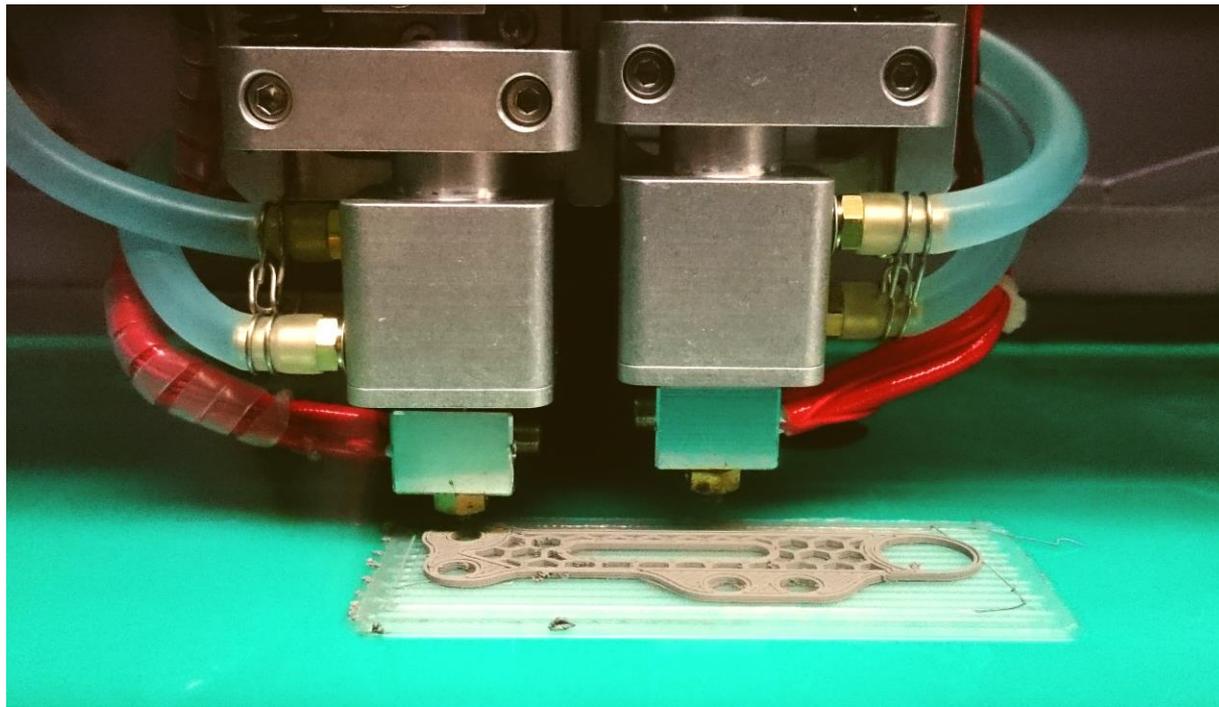

KONVENTIONELLE UND ADDITIVE FERTIGUNGS- VERFAHREN IN DER PRODUKTION VON BAUTEILEN

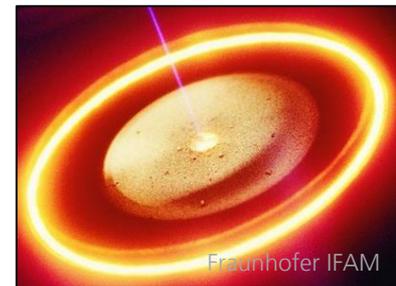
O. Andersen, Fraunhofer IFAM, Institutsteil Dresden



Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und angewandte Materialforschung IFAM

Additive Fertigung an den Standorten Bremen und Dresden:

- Mehr als 20 Jahre Erfahrung in Konstruktion, Werkstoff- und Prozessentwicklung
- 15 Wissenschaftler sowie 7 Techniker und Ingenieure ausschließlich mit dem Thema Additive Fertigung beschäftigt
- Verfahren:
 - Strahlschmelzverfahren (Laser, Elektronenstrahl)
 - Material Jetting (Tintenstrahl, Dispensdruck)
 - Binder Jetting
 - 3D-Siebdruck
 - Filamentdruck



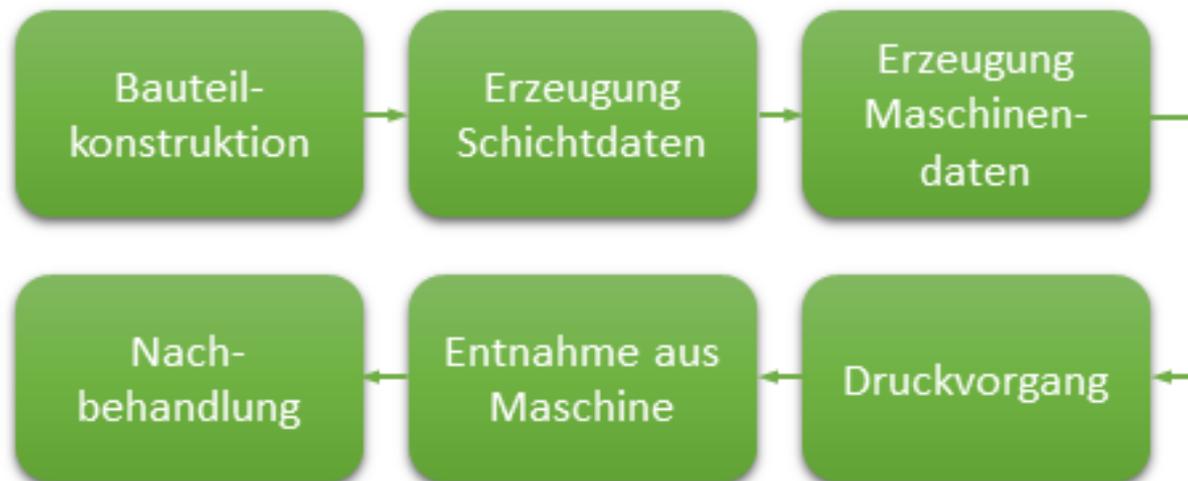
Inhaltsübersicht

- Vergleich additive Fertigung – spanende Fertigung
- Funktionsweise und Eigenschaften ausgewählter additiver Fertigungsverfahren
- Erzielbare Werkstoffeigenschaften
- Zusammenfassung

Definition und grundlegende Prozessschritte der Additiven Fertigung

Additives oder Generatives Fertigungsverfahren:

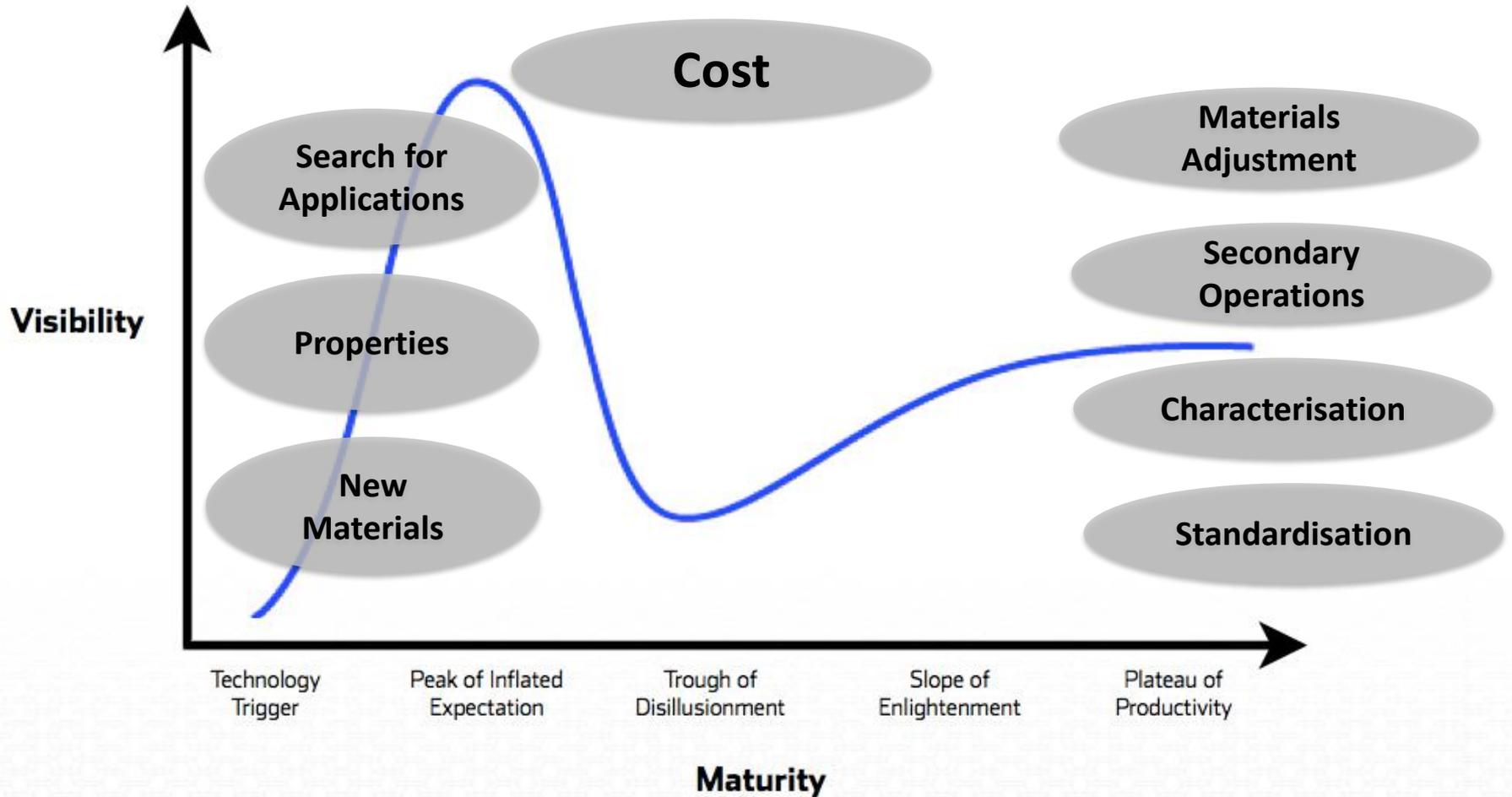
„Fertigungsverfahren, bei dem das Werkstück element- oder schichtweise aufgebaut wird“ (Definition nach VDI-Richtlinie 3405)



Systematisierung der AM-Verfahren nach DIN 8580

Bindemittelauftrag	Gezielter Auftrag eines flüssigen Bindemittels auf Pulverwerkstoffe, damit diese sich verbinden
Gerichtete Energieeinbringung	Verwendung einer fokussierten Wärmeenergie (z. B. ein Laser, Elektronenstrahl oder Plasmabogen), um Werkstoffe, so wie sie zugeführt werden, durch Schmelzen zu vereinigen
Werkstoffextrusion	Gezieltes Dosieren von Werkstoffen mit Hilfe einer Düse oder Öffnung
Werkstoffauftrag	Gezieltes Absetzen von Tropfen des Aufbauwerkstoffs
Pulverbettbasiertes Schmelzen	Wärmeenergie schmilzt gezielt Bereiche eines Pulverbetts
Schichtlaminierung	Verbindung von Werkstoffschichten, um ein Bauteil zu formen
Wannenbasierte Photopolymerisation	Ein flüssiges Photopolymer wird in einer Wanne gezielt durch lichtaktivierte Polymerisation ausgehärtet

The Gartner Hype Cycle



Source: Gartner. The hype cycle

Ökonomische Bedeutung der AM

- Gesamtumsatz AM (weltweit, enthält AM-Maschinenverkäufe, alle darauf gefertigten Produkte und Dienstleistungen, ohne Gießereitechnik¹⁾):
 - 2014: 4.1 Mrd. US\$
 - Prognose 2016: 7 Mrd. US\$²⁾
 - Prognose 2021: 21 Mrd. US\$¹⁾
- Wachstumsrate stieg von 25 auf 35 %¹⁾
- Umsatz aus Teileproduktion stark zunehmend
- Kommerziell relevant: Polymere, Metalle

Im Vergleich dazu: Gesamtumsatz des deutschen Werkzeugmaschinenmarktes inklusive Fertigungsdienstleistungen lag 2015 bei rund 30 Mrd. €³⁾

Quellen: 1) Wohlers-Report 2015, 2) SASAM-Roadmap, 3) VDW Marktreport 2015

Kostenvergleich LBM vs. Kunststoff-Spritzguss



Bauteilsgewicht: 15 g; Material: PA



	LBM	Spritzguss
	Materialkosten / Teil: 0.75 €	Materialkosten / Teil: 0.05 €
	Ausstoß pro 24 h: 500	Ausstoß pro 24 h: 5.000
# Teile	Kosten pro Bauteil	Kosten pro Bauteil
1	205 €	30.000,00 €
100	7 €	710,00 €
1.000	5 €	3,60 €
1.000.000	5 €	0,14 €

Quelle: G. Schwalm, Technologien der additiven Fertigung, Süddeutsches Kunststoffzentrum e. V., 2014

Zeitspanvolumen moderner Fräsmaschinen



Verdichterschraube für Dampfmotor

Aluminium

Werkstoff: 3.4365 -
AlZnMgCu1,5
Fräser: D 16mm
Schneiden: z = 3
Schnittgeschwindigkeit: $V_c = 650$ m/min
Drehzahl: $n = 13.000$ U/min
Vorschub: $F = 12.000$ mm/min
Zahnvorschub: $Z_n = 0,3$ mm
Schnittbreite: $a_e = 10$ mm
Schnitttiefe: $a_p = 15$ mm

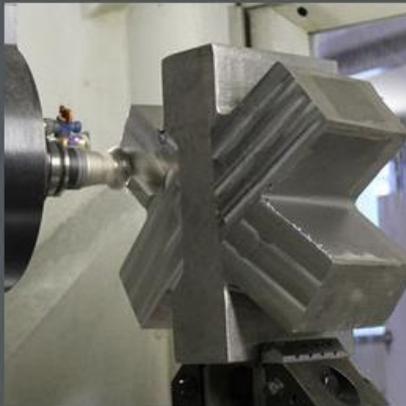
Zeitspanvolumen: 1800 cm³/min



Edelstahl

Werkstoff: 1,2343 - X38CrMoV 5 1
Fräser: D 40mm R4
Schneiden: z = 6
Schnittgeschwindigkeit: $V_c = 380$ m/min
Drehzahl: $n = 3000$ U/min
Vorschub: $F = 10000$ mm/min
Zahnvorschub: $Z_n = 0,55$ mm
Schnittbreite: $a_e = 32$ mm
Schnitttiefe: $a_p = 1$ mm

Zeitspanvolumen: 320 cm³/min



Stahl

Werkstoff: S355
Fräser: D 50mm
Schneiden: z = 4
Schnittgeschwindigkeit: $V_c = 310$ m/min
Drehzahl: $n = 2000$ U/min
Vorschub: $F = 8000$ mm/min
Zahnvorschub: $Z_n = 1,0$ mm
Schnittbreite: $a_e = 50$ mm
Schnitttiefe: $a_p = 1,5$ mm

Zeitspanvolumen: 600 cm³/min

Beispiele für das Zeitspanvolumen von 5-Achs-Parallelkinematik-Bearbeitungszentren:

AlZnMgCu1: 1.800 cm³/min

X38CroMoV51: 320 cm³/min

C-Stahl S355: 600 cm³/min

Zum Vergleich:

LBM: ca. 1 cm³/min

Quelle: <https://www.metrom-mobil.com/startseite/anwendungsbeispiele/>

Werkzeug-Standzeiten und Materialkosten beim Hochgeschwindigkeitsfräsen

- Kosten eines industriellen Fräasers: ca. 50 bis 500 €
- Typische Standzeit: 15 bis 30 min

Beispielrechnung für das Fräsen von Aluminium:

- Werkzeug: 100 €
- Standzeit: 30 min
- Zeitspanvolumen: 1.000 cm³/min
- ➔ Werkzeugkosten pro cm³ zerspantem Volumen und pro cm³ Bauteilvolumen¹⁾: 0,0033 €/cm³

Vergleich mit den Werkstoffkosten: ca. 10 €/kg \approx 0,027 €/cm³

1) Annahme: 50 % Nutzungsgrad des Halbzeuges ➔ für 1 cm³ Fertigteil muss 1 cm³ Halbzeug zerspannt werden; Materialkosten berücksichtigen demnach das Doppelte des Fertigteilvolumens (50 % Zerspanvolumen + 50 % Bauteilvolumen)

Werkzeugkosten beim Laserschmelzen

Beispielrechnung für die Werkzeugkosten:

- Kosten der Strahleinheit: ca. 15.000 €
- Typische Lebensdauer: 20.000 h
- Baurate: 50 cm³/h
- ➔ Werkzeugkosten pro cm³ Bauteilvolumen (ohne Support-Strukturen): 0,015 €
- ➔ Kosten sind bei Massenfertigung von geeigneten Bauteilen um ein bis zwei Größenordnungen höher als mit zerspanender Fertigung
- ➔ VDW-Marktbericht 2015 zeigte ebenfalls, dass innerhalb der nächsten 5 bis 10 Jahre keine radikalen Änderungen durch AM zu erwarten sind
- ➔ Kosten sind jedoch immer Bauteil-individuell zu sehen. Bei bestimmten Kombinationen von Stückzahl, Werkstoff und Geometrie ist AM u. U. kostengünstiger, außerdem erweiterte Design-Möglichkeiten

Ein genauerer Blick auf den Wohlers-Report

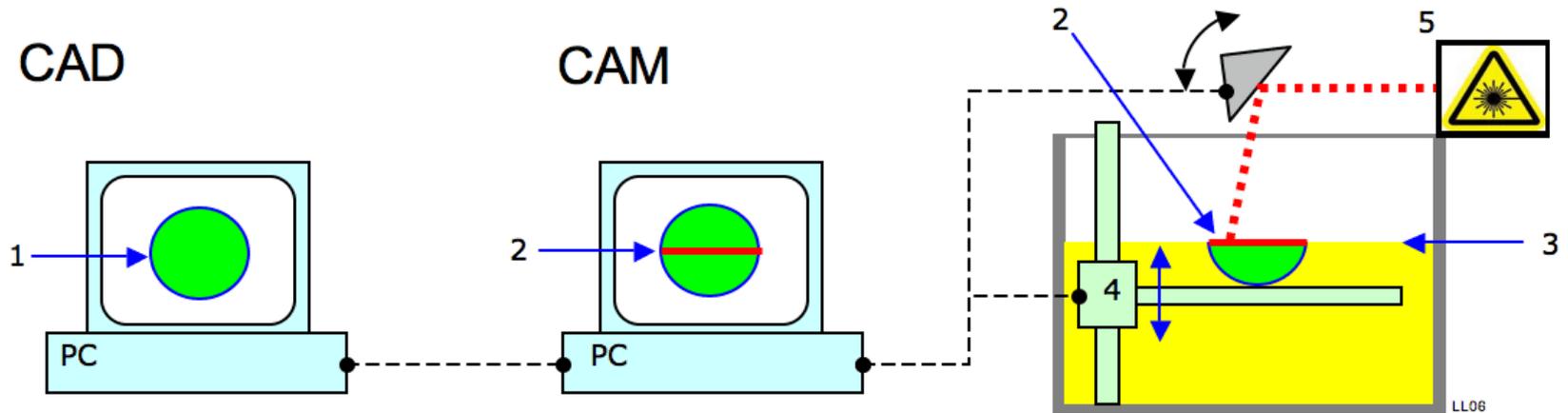
Auf den ersten Blick gibt es einen Widerspruch zwischen der VDW-Beurteilung und den Voraussagen des Wohlers-Reports 2015, wonach der Gesamtumsatz der AM-Branche in 2021 ca. 2/3 des gesamten deutschen Werkzeugmaschinenmarktes erreicht. Erklärung:

- Der Wohlers-Report addiert sämtliche Produktionsdienstleistungen aller jemals verkauften AM-Maschinen. Im Gegensatz dazu fällt eine deutsche Werkzeugmaschine, die ins Ausland verkauft wurde, aus der deutschen Dienstleistungsbilanz heraus
- Ein großer Teil des AM-Umsatzes resultiert aus Materialverkäufen im Polymer-Bereich (in 2014 z. B. rund 300 Mio. \$ für Photopolymere, was ungefähr 30 % des Gesamtumsatzes der Branche in 2014 ausmachte)

Inhaltsübersicht

- Vergleich additive Fertigung – spanende Fertigung
- Funktionsweise und Eigenschaften ausgewählter additiver Fertigungsverfahren
- Erzielbare Werkstoffeigenschaften
- Zusammenfassung

Lithographie (1)



Von Laurensvanlieshout, CC BY-SA 3.0

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1757025>

Fertigungsablauf:

1. Computermodell (1), Slicing (2)
2. Belichtung der Schicht (2) mit Lichtquelle (5) im Bauraum
3. Absenken der Bauplatattform (4)
4. Fluten mit Suspension (3)
5. Belichten der nächsten Schicht

Lithographie (2)

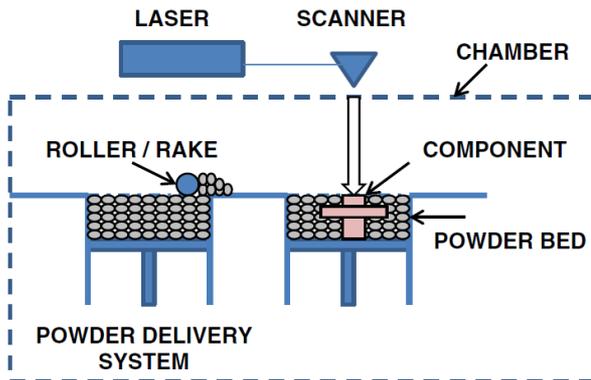
- Etabliertes Verfahren zur additiven Fertigung von dichten Bauteilen aus Hochleistungs-Keramik
 - Auflösung 30 bis 60 μm
 - Schichtdicken 10 bis 150 μm
 - Gute Produktivität, hohe Oberflächengüte
- Proof-of-Concept für 316L (Lithoz):
 - Verwendung gröberer Pulver, um Aushärtung in der Tiefe zu gewährleisten
 - Sinterdichte von 96 % erreicht
 - Photopolymere noch recht teuer



Keramische Bauteile
www.lithoz.com

Strahlschmelzverfahren

Pulverbett



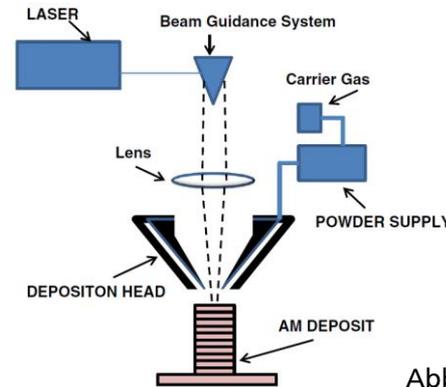
Energiequelle:

- Laserstrahl
- Elektronenstrahl

Maximale Bauraten:

≈ 100 cm³/h

Pulverzufuhr



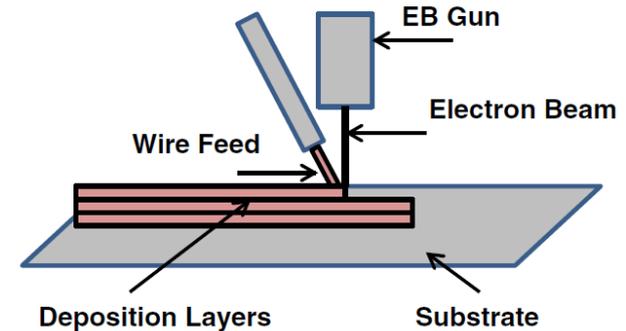
Energiequelle:

- Laserstrahl

Maximale Bauraten:

≈ 30 cm³/h

Drahtzufuhr



Abbildungen: W. E. Frazier, JMEPEG (2014) 23:1917–1928

Energiequelle:

- Laser- & Elektronenstrahl
- Lichtbogen
- Plasmabrenner

Maximale Bauraten:

5,000 cm³/h und mehr

Bauraten für drahtbasierte Verfahren berechnet aus Informationen in: E. Herderick, Proceedings MS&T 2011:1413-1425
 Bauraten für pulverbasierte Verfahren berechnet aus Informationen in: W. Ul Haq Syed et al., J. Laser Appl., 18(2006)1:65-72

Video Elektronenstrahlschmelzen

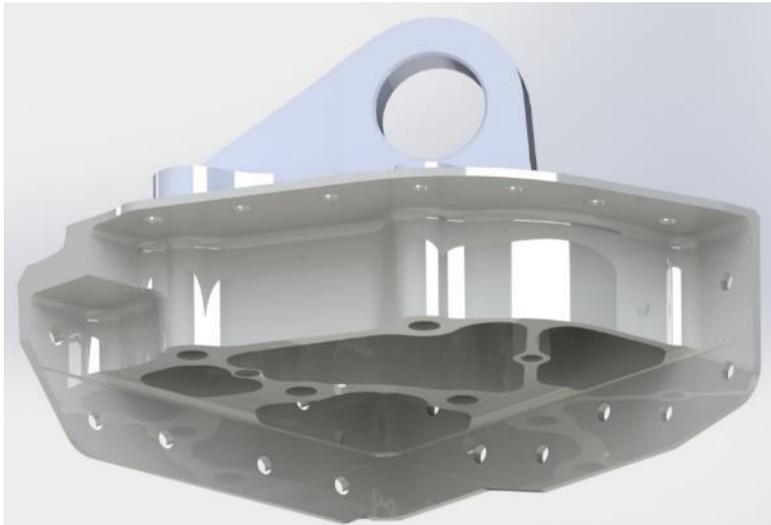
Process Animation
SEBM Selective Electron
Beam Melting

created for
Neue Materialien Fürth GmbH
www.nmfgmbh.de



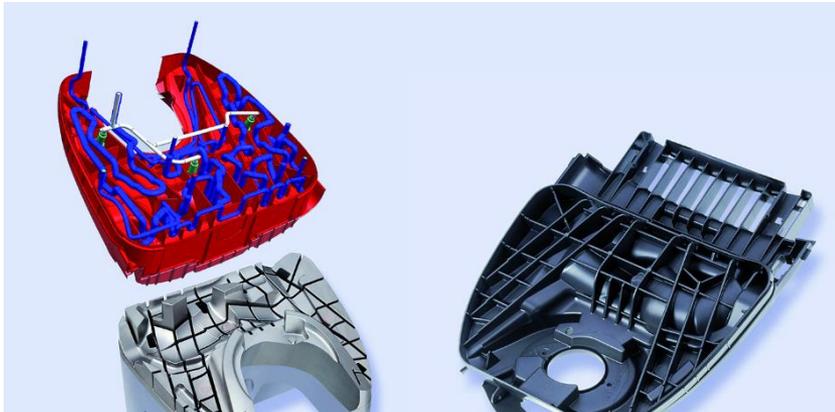
Topologie-Optimierung: Beispiel EBM-Bracket

- Rotorblatt-Aufhängung aus Ti-6Al-4V
- Gewichtsreduktion um 50 %
- Herstellung als ein komplettes Bauteil



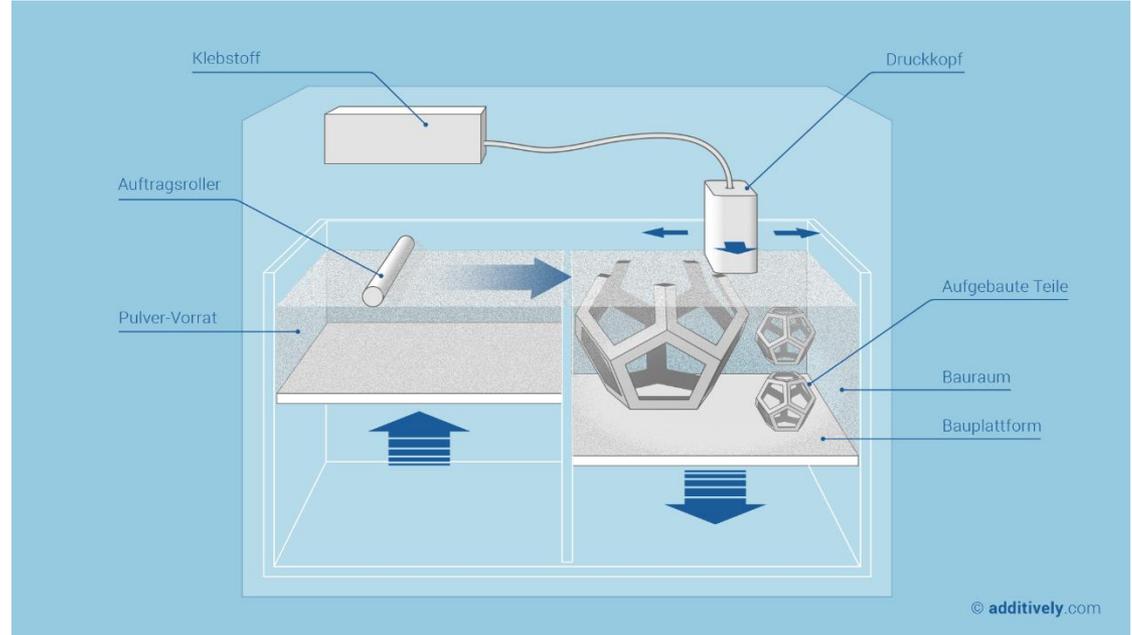
Konturnah gekühlte Spritzgusswerkzeuge

- Beispiel Concept Laser / Hofman Tooling: Kombination aus CNC-gefrästen Teilen und lasergeschmolzenen Kühleinsätzen
- Erlaubt deutliche Reduzierung der Zykluszeiten durch konturnahe Kühlung



Bildquelle: https://www.concept-laser.de/contact_usa/industries/tooling//

Binder Jetting (1)

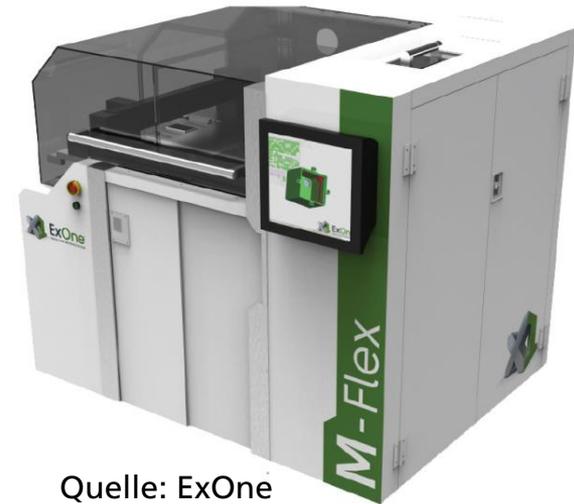


Ablauf Druckvorgang:

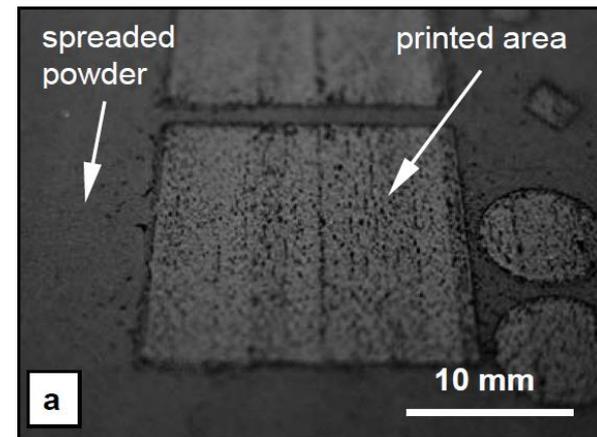
- Frische Pulverschicht im Pulverbett erzeugen
- Binder verdrucken
- Binder trocknen
- Bauplattform absenken und nächste Pulverschicht aufbringen

Binder Jetting (2)

- Verfahrenseigenschaften:
 - Auflösung 35 bis 150 μm
 - Lagendicke 30 bis 150 μm
 - Hohe Bauraten bis zu 1.000 cm^3/h
 - Größere Teile möglich (Entbindern und Sintern begrenzen allerdings die sinnvolle Bauteilgröße)
 - Keine Supportstrukturen erforderlich
 - Metallische und keramische Werkstoffe möglich, Pulverteilchengrößen typisch $> 20 \mu\text{m}$
 - Gründichten 45 bis 60 %, Sinterdichten $> 95 \%$ erzielbar
 - Geringe Bindergehalte



Quelle: ExOne



Binder Jetting (3)

- Bauteileigenschaften:
 - Oberflächenrauheit
 $R_z \approx 5$ bis $50 \mu\text{m}$
 - Dichte: 95 -98 %
 - Nachbehandlung: Reinigen, Glätten, Infiltration
- Maschinenanbieter u. a.
 - ExOne (USA)
 - Digital Metal (Schweden)
 - HP (USA)
 - Desktop Metal (USA) → 450 Mio. US\$ Risikokapital!



Design: Airbus Deutschland GmbH

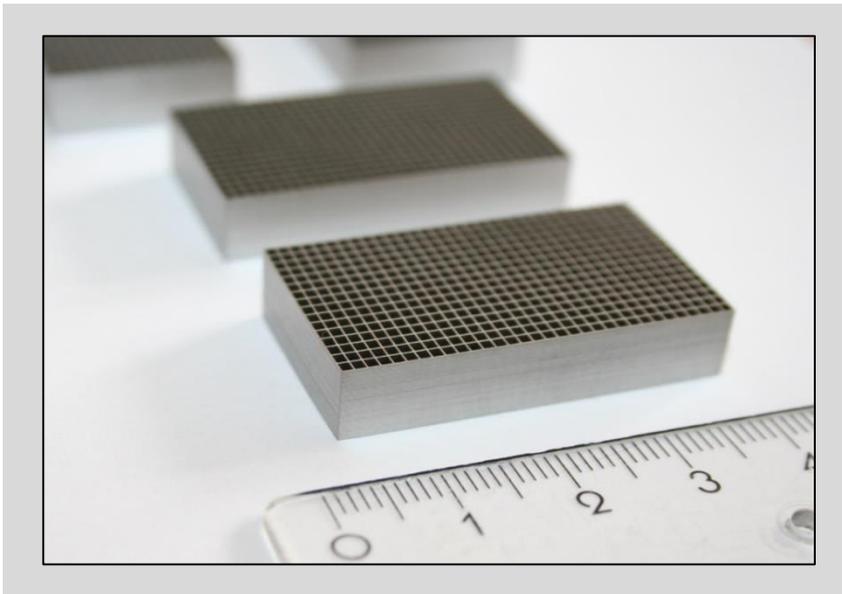
3D-Siebdruck (<https://www.youtube.com/watch?v=d7sx4UK6if81>)



3D Screen Printing

Bauteilbeispiel 3D-Siebdruck

- Röntgenkollimator aus Wolfram-Legierung, Bauteilhöhe > 5 mm
- Einsparungen von 80 % in Bezug auf Materialeinsatz und Energiebedarf
- Lagetoleranzanforderung für alle Stege von +/- 20 µm eingehalten
- Nächste Schritte: Prototypen-Tests, Qualifizierung der Serienfertigung

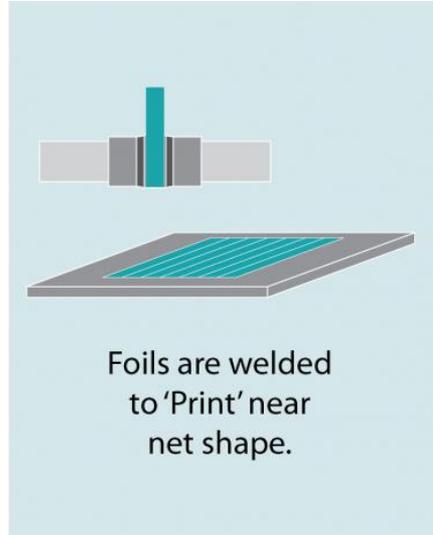


Partner:
Siemens Healthineers
H.C. Starck Hermsdorf GmbH

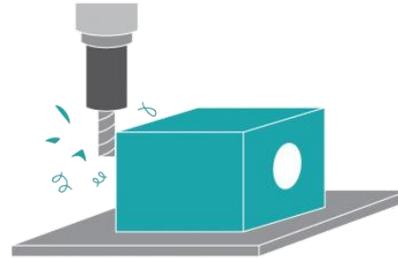
FABRISONIC ultrasonic welding LOM process (1)



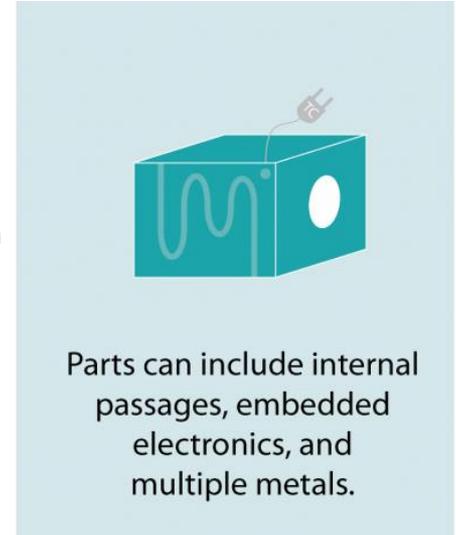
Fabrisonic starts with a thin sheet.



Foils are welded to 'Print' near net shape.



A small amount of machining to assure perfect tolerance and shape.

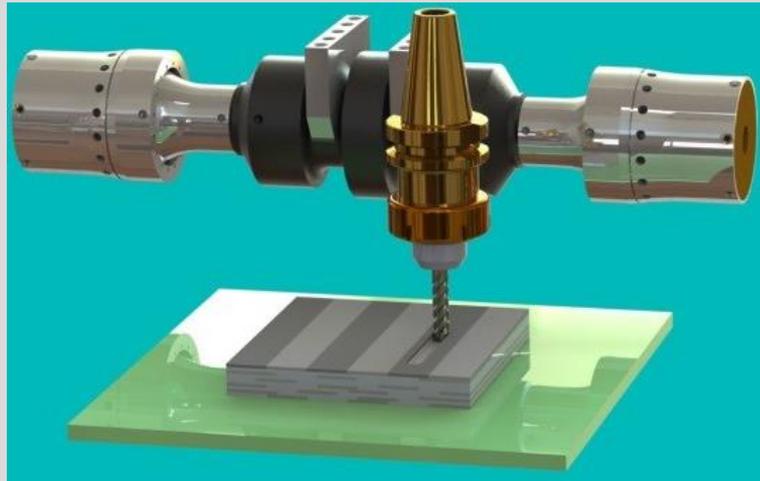
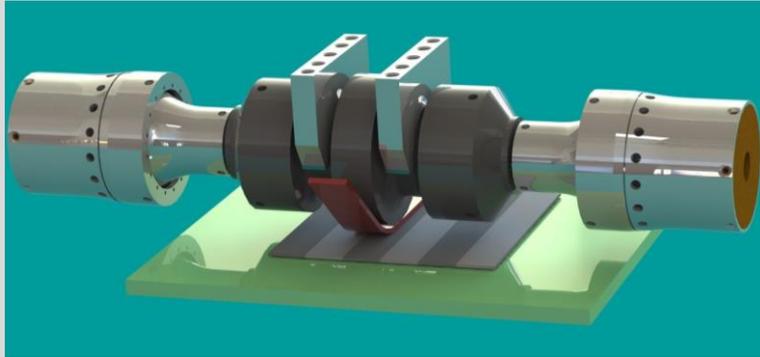


Parts can include internal passages, embedded electronics, and multiple metals.

- Combination of additive and subtractive manufacturing → commercial 3 axis CNC mill combined with a patented ultrasonic welding head
- Ultrasonic welding results in low processing temperatures
- Build rate up to 500 cm³/h
- Smooth surfaces and low tolerances
- Ability to combine different materials

Source: <http://fabrisonic.com>

FABRISONIC ultrasonic welding LOM process (2)



Source: <http://fabrisonic.com>



- SonicLayer 7200: maximum build space 1,800 mm x 1,800 mm x 900 mm
- Applications:
 - Al-Ti laminate armor
 - Embedded electronics
 - Heat exchangers

Inhaltsübersicht

- Vergleich additive Fertigung – spanende Fertigung
- Funktionsweise und Eigenschaften ausgewählter additiver Fertigungsverfahren
- Erzielbare Werkstoffeigenschaften
- Zusammenfassung

Erzielbare Werkstoffeigenschaften (1)

Verfahren mit Sinterung: mindestens MIM-Standards erzielbar, Beispiel: Binder Jetting, Vergleich mit normativen Mindestwerten des MIM-Standards ISO 22068:2014

Material	Typische Materialkennwerte (Angaben von Digital Metal)			Normative Werte (ISO 22068:2014)		
	Zugfestigkeit [MPa]	0,2 %- Dehngrenze [MPa]	Bruchdehnung [%]	Zugfestigkeit [MPa]	0,2 %- Dehngrenze [MPa]	Bruchdehnung [%]
316L	520	180	50	450	140	40
17-4 PH	900	730	6	800	650	3
Ti6AL4V	890	790	8	800	600	3

Erzielbare Werkstoffeigenschaften (2)

Strahlschmelzverfahren: stark abhängig vom Wärmebehandlungszustand, aufgrund feinkörniger Ausgangsgefüge teilweise besser als Normwerte

Zusammenfassung

- Strahlbasierte Verfahren eignen sich für größerer Bauteile und kleinere Stückzahlen, erfordern aber in der Regel einen hohen Nachbearbeitungsaufwand mit derzeit noch sehr geringem Automatisierungsgrad
- Verfahren mit Sinterschritt eignen sich für kleinere Bauteile und hohe Stückzahlen und erfordern in der Regel nur geringe bis keine Nacharbeit
- „Konventionelle“ Fertigung hat keine disruptiven Veränderungen durch AM zu befürchten, dafür sind auf absehbare Zeit die Kosten zu hoch bzw. die Produktivität zu gering (mögliche Ausnahme: Feinguss vs. Binder Jetting)
- In bestimmten Fällen bietet AM Kosten- und Designvorteile → Entscheidungen sind immer nur bauteilbezogen (Geometrie, Stückzahl, Werkstoff) zu treffen

Messen und Weiterbildungsveranstaltungen

PM Life! AM Training Week 2019

<https://www.pmlifetraining.com/>

26.-30. August 2019, Dresden



formnext 2019

<https://formnext.mesago.com/events/de.html>

19.-22. November 2019, Frankfurt

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

**Fraunhofer-Institute for Manufacturing Technology
and Advanced Materials IFAM
Branch Lab Dresden**

**Department of Cellular Metallic Materials
Dr.-Ing. Olaf Andersen
Winterbergstraße 28
D-01277 Dresden
Germany**

**Phone: +49 351 2537-319
Fax: +49 351 2554-451
Mobile: +49 172 8363226
Email: olaf.andersen@ifam-dd.fraunhofer.de
Web: www.ifam-dd.fraunhofer.de**