

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

ADVANCED MATERIALS PROCESSING AND MICROFABRICATION

Additive Fertigung – Dr.-Ing. Jonathan Lentz



Lehrstuhl
Werkstofftechnik
Materials Technology

LERNZIELE

- **Additive Fertigungsverfahren einordnen können**
- **Werkstofftechnische Eigenschaften des PBF-LB/M**
- **Vor- und Nachteile, Herausforderungen und Trends verstehen**

Inhalt

- **Einordnung & Motivation der additiven Fertigung**
- **Übersicht additiver Fertigungsverfahren**
- **Fokus: PBF-LB/M-Verfahren**
- **Mikrostrukturen und Eigenschaften**
- **Herausforderungen und zukünftige Entwicklungen**
- **Zusammenfassung**

EINORDNUNG - Definition

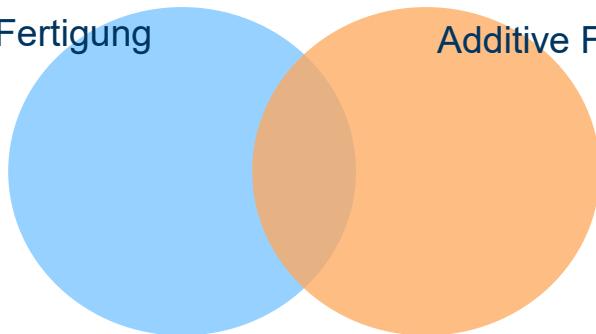
Definition nach DIN EN ISO/ASTM 52900:

„Prozess, der durch Verbinden von Material *Bauteile* aus 3-D-Modelldaten, im Gegensatz zu subtraktiven und umformenden Fertigungsmethoden, üblicherweise *Schicht* für *Schicht*, herstellt.“



EINORDNUNG - Definition

Konventionelle Fertigung



Additive Fertigung

Hybride Fertigung

- Additive Fertigung auf vorgeformten Substraten
- Roboter basierte-Fertigung unter Wechsel additiver und substratikrer Werkzeuge



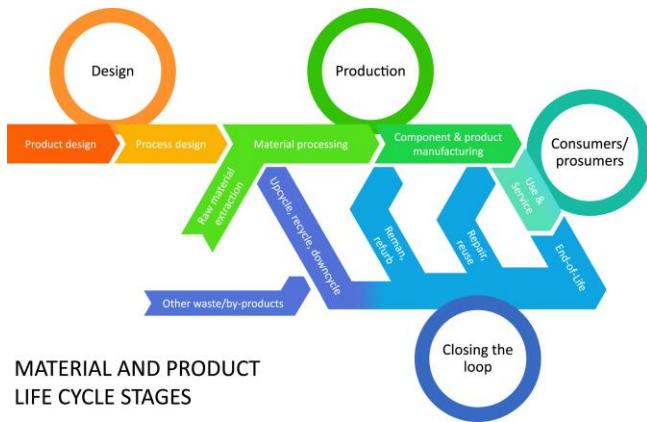
<https://www.autodesk.com/de/design-make/articles/lasimm-vereint-additive-und-subtraktive-herstellungsverfahren>

MOTIVATION - Nachhaltigkeit



- SDG 9, 11, 12
- Leichtbau
- Erweiterte Funktionalität
- Höhere Materialausnutzung (100% im Vergleich zu oft < 5%)

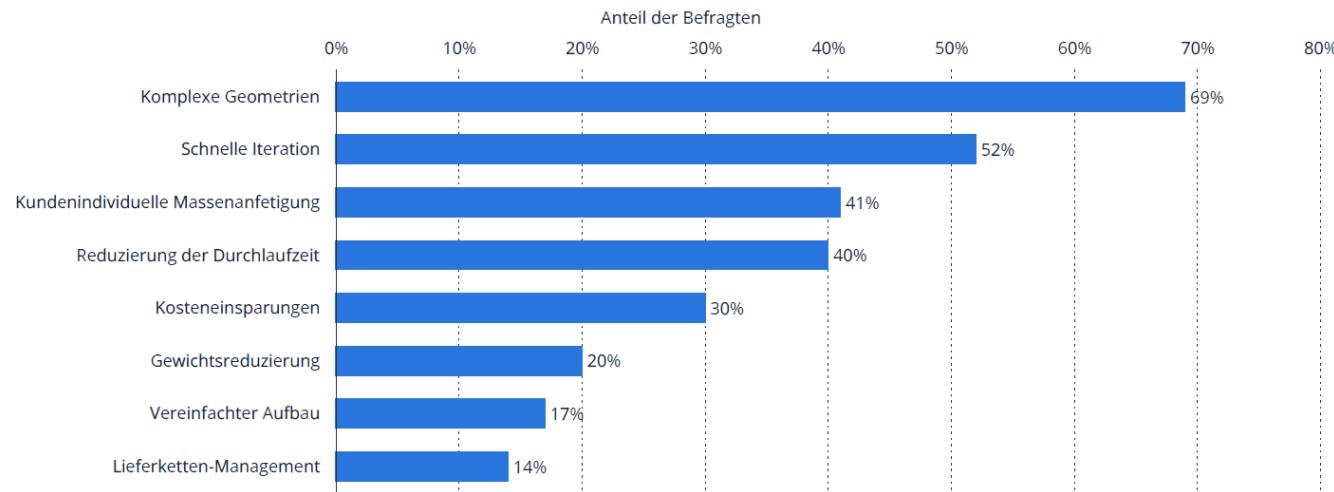
DfAM → Design for AM



Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges, Journal of Cleaner Production, 2016,

MOTIVATION – Vorteile

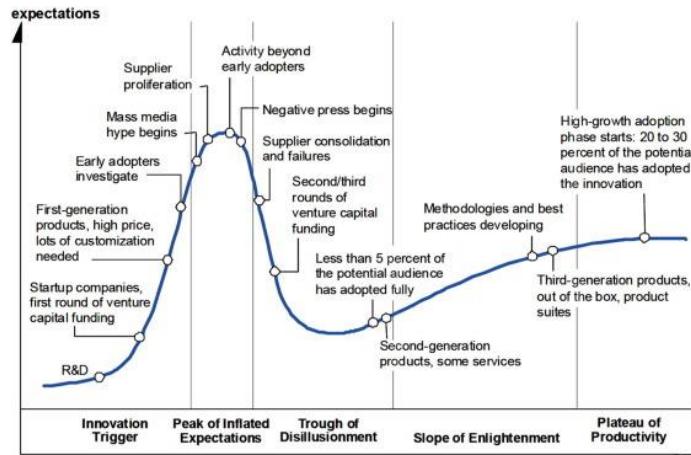
Was sind die Hauptvorteile des 3D-Drucks?



Statista, Additive Fertigung Report, 2023

EINORDNUNG – Hype um Additive Fertigung?

Gartner's Hype Cycle



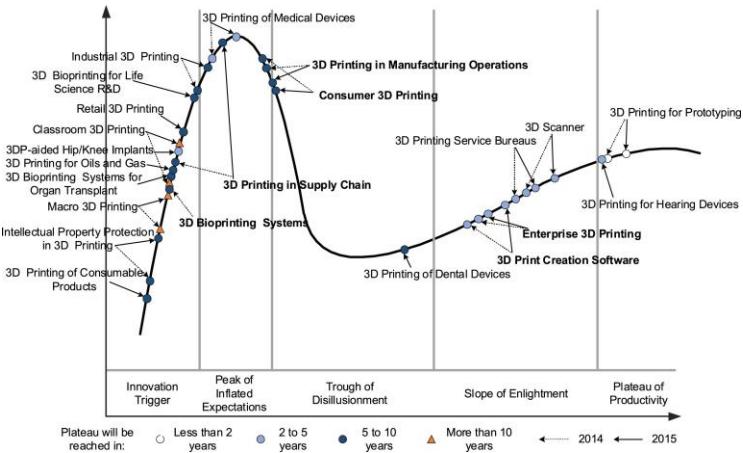
R. Kreutzer, Digitale Revolution, 2015, Der Gartner Hype Cycle als prognostischer Hintergrund

- Technology Trigger („Technologische Impulse“)
- Peak of Inflated Expectations („Höhepunkt der überzogenen Erwartungen“)
- Trough of Disillusionment („Tiefpunkt der Ernüchterung“)
- Slope of Enlightenment („Anstieg der Erkenntnis/Aufklärung“)
- Plateau of Productivity („Produktivitätsplateau“)

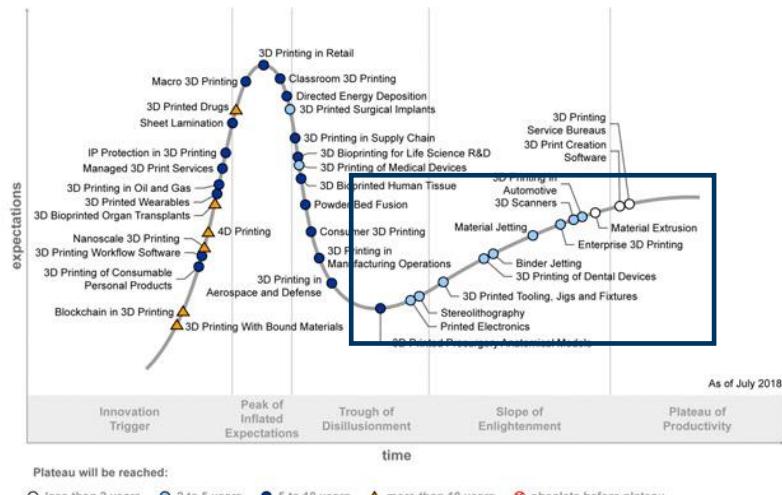
„Wir neigen dazu, die kurzfristige Wirkung einer Technologie zu überschätzen und die langfristige Wirkung zu unterschätzen.“

EINORDNUNG – Hype um Additive Fertigung?

2014 & 2015



2018



MOTIVATION – Wachstumsmarkt

“ARK estimates that manufacturing robots and 3D printing could scale at a 80% annual rate during the next eight years, from \$70 billion in 2022 to \$9 trillion by 2030.”



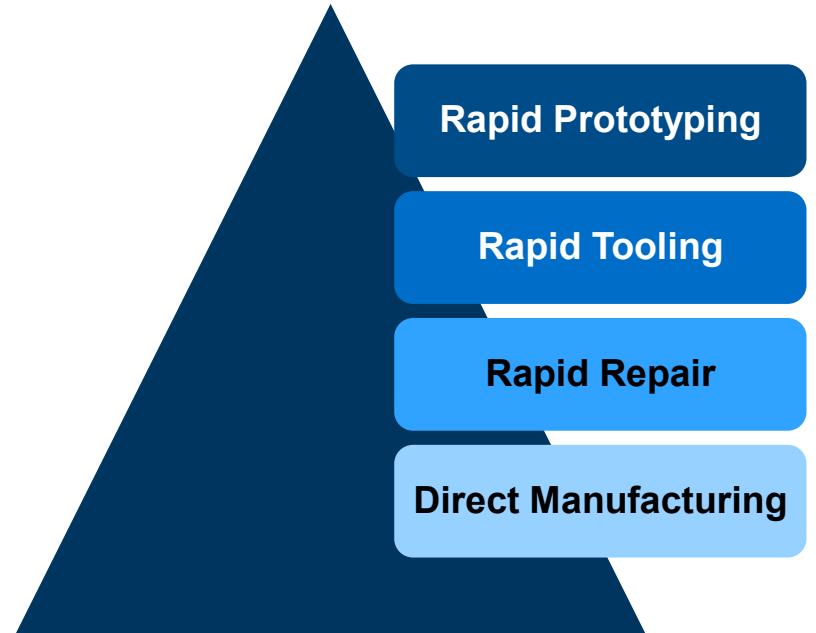
BIG IDEAS 2023, White Paper, ARK Investment Management LLC.

EINORDNUNG - Einsatzbereiche

Marktpotential in verschiedenen Bereichen

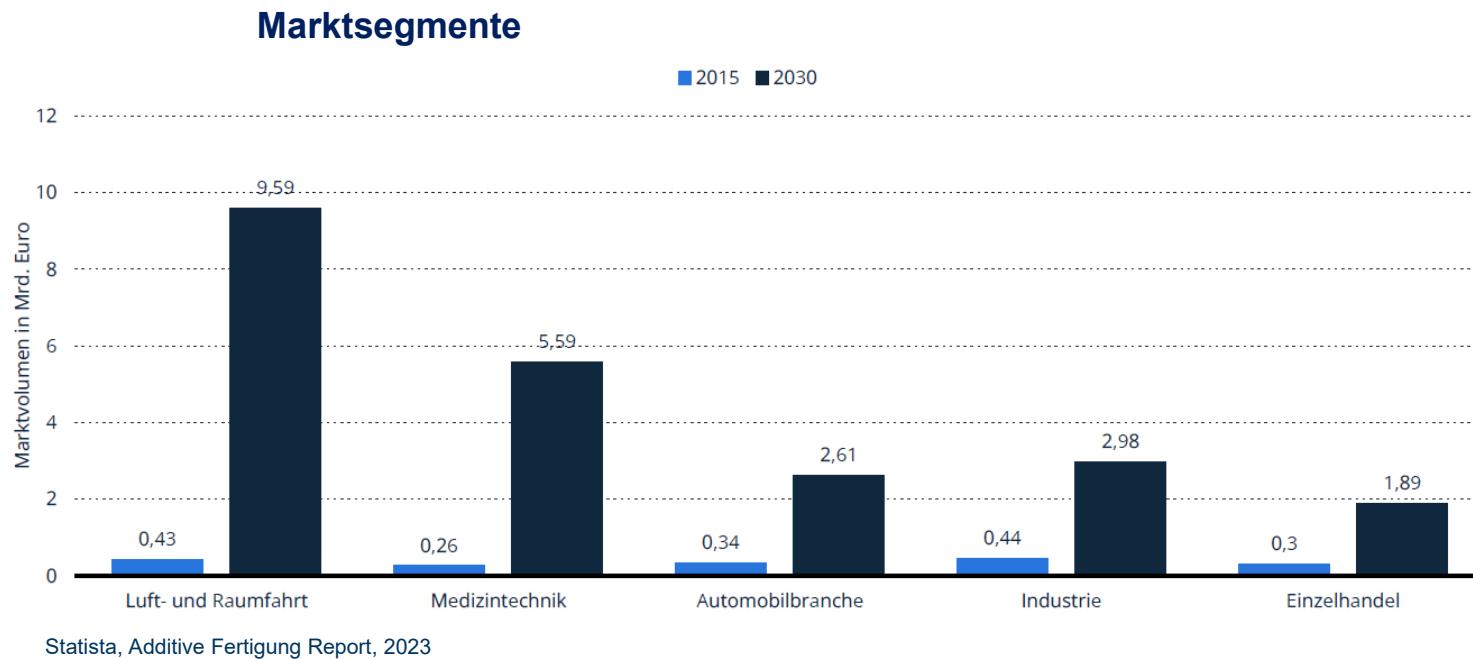
	Prototypen	Formen & Werkzeuge	Endverbrauch-Teile
Marktpotential	\$12,5 Milliarden	\$30 Milliarden	\$490 Milliarden
aktuelle Verwendung	40 – 50 %	6 %	1 %
erste Anwendung	1980er	1990er	frühe 2000er

ARK Investment Management LLC (2020) Big Ideas 2020 – by ARC Invest [online]. <https://ark-invest.com/>.

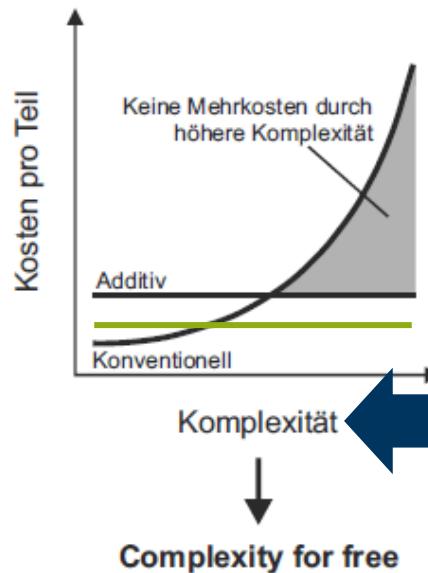
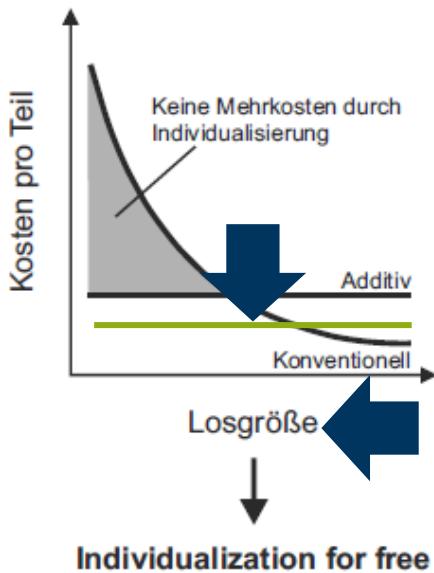


Einsatzbereiche nach VDI 3405

EINORDNUNG – Branchen



MOTIVATION – Kostenfaktor?



Kosten sinken

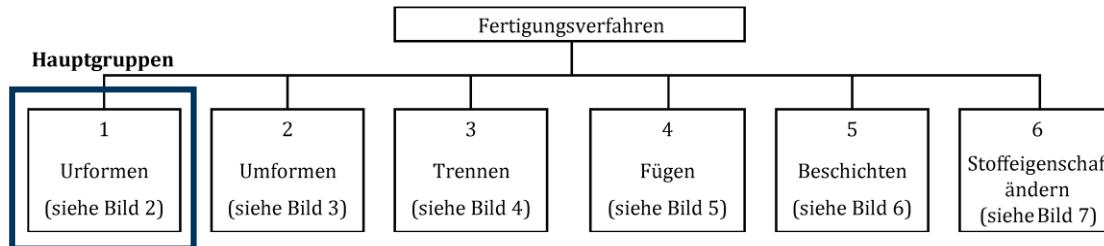
- Geringe Losgrößen und Bauteile geringerer Komplexität werden wirtschaftlich

Kumke (2018) Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen.
Springer Fachmedien Wiesbaden.

EINORDNUNG - Fertigungsverfahren

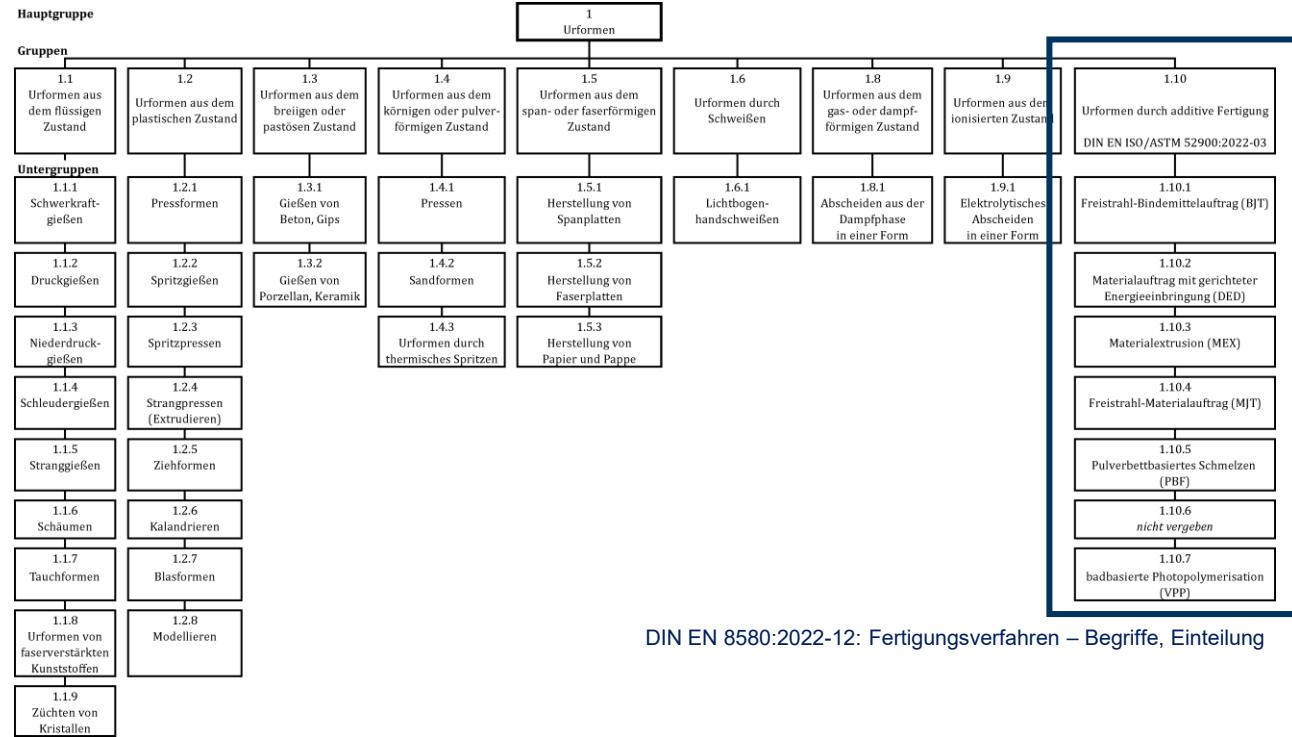
DIN EN 8580:2022: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung

„Verfahren zur Herstellung von geometrisch bestimmten festen Körpern, einschließlich der Verfahren zur Gewinnung erster Formen aus dem formlosen Zustand, zur Veränderung dieser Form sowie zur Veränderung der Stoffeigenschaften.“



DIN EN 8580:2022-12: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung

EINORDNUNG - Fertigungsverfahren



EINORDNUNG – Fertigungsverfahren & Normen

Normen:

DIN EN 8580:2022-12: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung

- Grundlegende Einteilung aller Fertigungsverfahren

DIN EN ISO/ASTM 52900:2022-3: Additive Fertigung – Grundlagen, Terminologie

- Einteilung & Terminologie der AM-Verfahren

DIN EN ISO 17296-2: Überblick über Prozesskategorien und Ausgangswerkstoffe

- Technische Beschreibung der additiven Fertigungsverfahren, sowie zum Einsatz kommende Werkstoffe, Werkzeuge und Wirkmedien

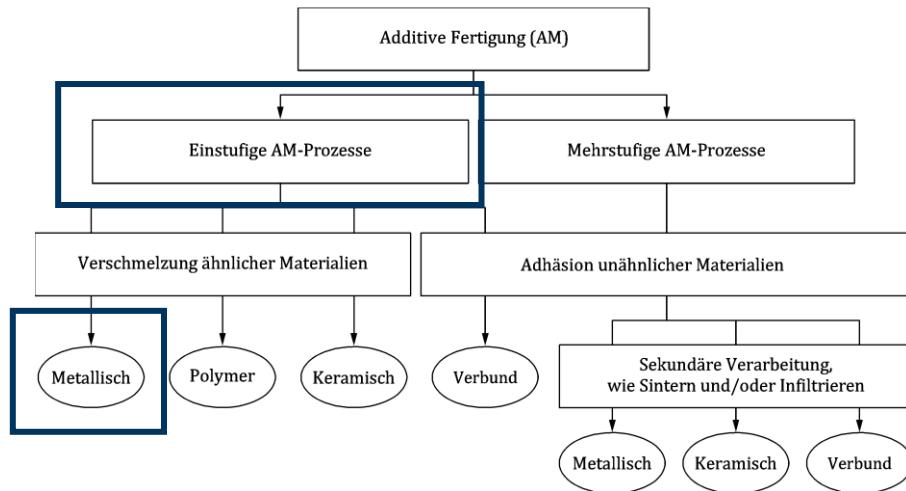
VDI Richtlinien 3405:

- Hinweise für die Praxis von Grundlagen, Konstruktionsrichtlinien bis zur Qualitätsprüfung

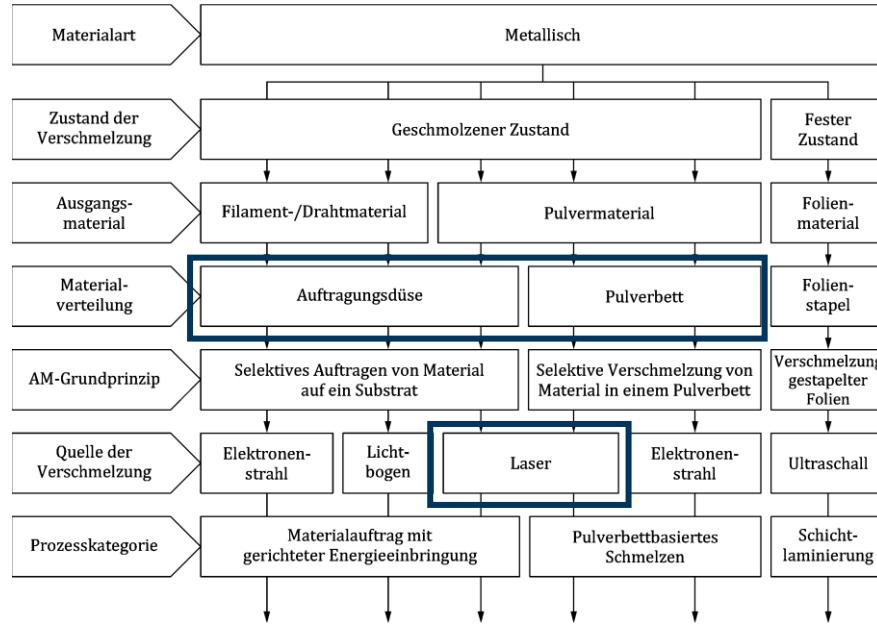
VDI 3405 Additive Fertigungsverfahren: Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen

VDI 3405 Blatt 1 Polymere und Blatt 2 Metalle: Qualifizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung → Richtlinien zur Qualitätskontrolle und Prüfverfahren (Dichte, Härte, Oberflächengüte, Festigkeit usw.)

EINORDNUNG – Einteilung nach DIN EN ISO/ASTM 52900:2022-3



EINORDNUNG – Einteilung nach DIN EN ISO/ASTM 52900:2022-3



EINORDNUNG – Terminologie nach DIN EN ISO/ASTM 52900:2022-3

Verfahren	Kurzbezeichnung	Energiequelle	Materialart	Kurzbeschreibung
pulverbettbasiertes Schmelzen	PBF (powder bed fusion)	-LB (Laser Beam) -EB (Electron Beam)		Durch fokussierte Elektronen- oder Laserstrahlen wird ein Pulverbett selektiv aufgeschmolzen
Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung:	DED (Directed energy deposition)	-LB (Laser Beam) -Arc (Lichtbogen)	/M (Metal) /P (Polymer) /C (Ceramic) /Cp (Composite)	Fokussierte Laserstrahlung oder Lichtbogen werden genutzt, um Material selektiv aufzutragen und direkt während des Auftrages aufzuschmelzen
Materialextrusion	MEX (material extrusion)	-CRB (chemical reaction bonding) -TRB (thermal reaction bonding)		Material wird durch eine Düse selektiv aufgetragen

EINORDNUNG – Terminologie nach DIN EN ISO/ASTM 52900:2022-3

Beispiele:

- Pulverbettbasiertes Schmelzen (PBF) mittels Laserstrahl(-LB) von einem Metall (/M):

PBF-LB/M

- Direkter Energieeinbringung (DED) mittels Lichtbogen (-Arc) von Metall (/M):

DED-Arc/M

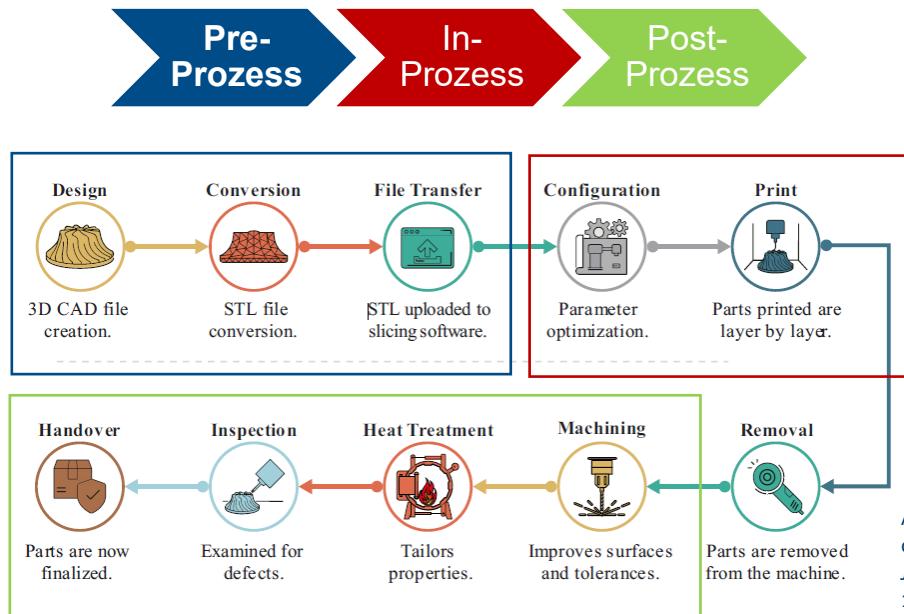
EINORDNUNG – Alternativen Terminologie

Normbezeichnung	Im Sprachgebrauch genutzte Alternativbezeichnung
PBF-LB/M	SLM (Selective Laser Melting), PBF (Powder Bed Fusion)
PBF-EB/M	EBM (Electron Beam Melting)
DED-LB/M	LMD (Laser Metal Deposition)
DED-Arc/M	WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing)
MEX-TRB/P bzw. /Cp	FDM (Fused Deposition Melting, FDMet (Fused Deposition of Metals), FFF (Fused Filament Fabrication)

- Richtig ist die Bezeichnung nach DIN EN ISO/ASTM 52900

VERFAHREN - Prozessschritte

Prozessschritte nach VDI 3405



Prozessschritte nach VDI 3405:

▪ Pre-Prozess

- Datenvorbereitung,
- Erzeugung von Zusatz- und Hilfsgeometrien (z. B. Stützkonstruktionen),
- Anordnen der Bauteile im Bauraum und die Schichtdatengenerierung,
- prozessvorbereitende Maßnahmen (Anlagenvorbereitung, Materialbefüllung...)

▪ In-Prozess

- schichtweiser Bauteilaufbau
- Entnehmen der Bauteile

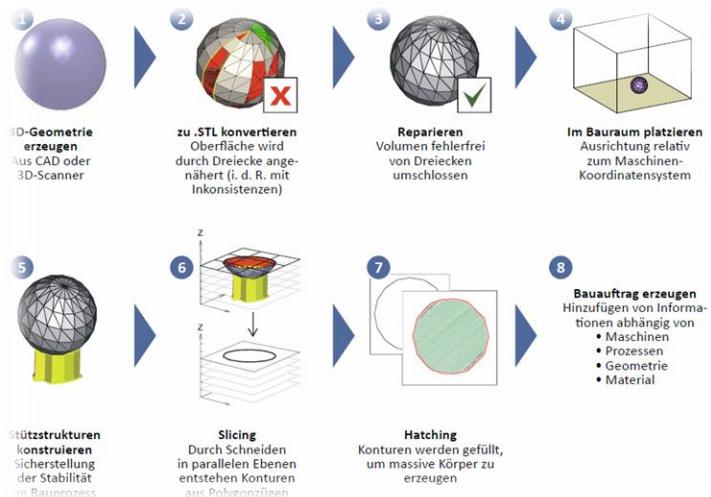
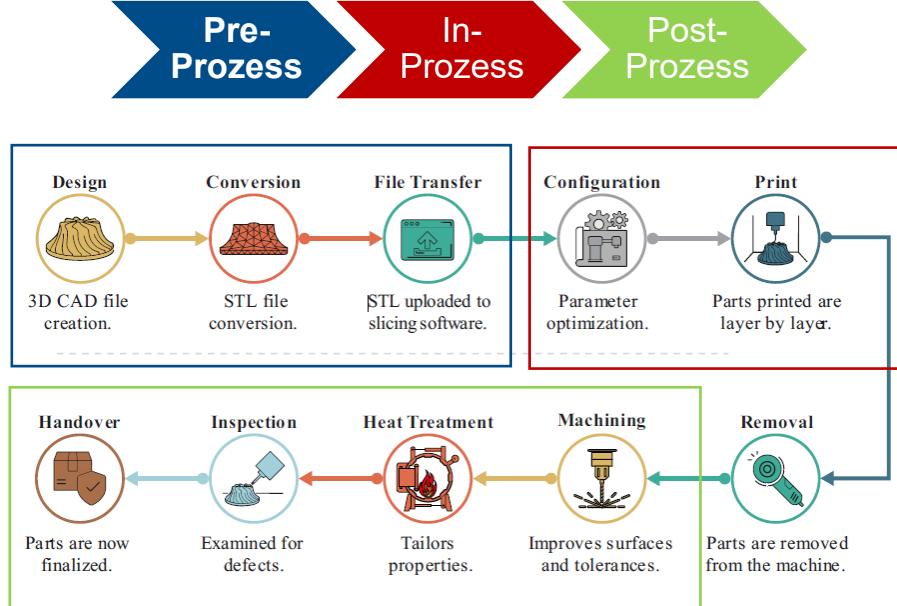
▪ Post-Prozess

- Entfernung von Pulverrückständen & Stützkonstruktionen
- Einstellen der Bauteileigenschaften (Wärmebehandeln, Polieren)

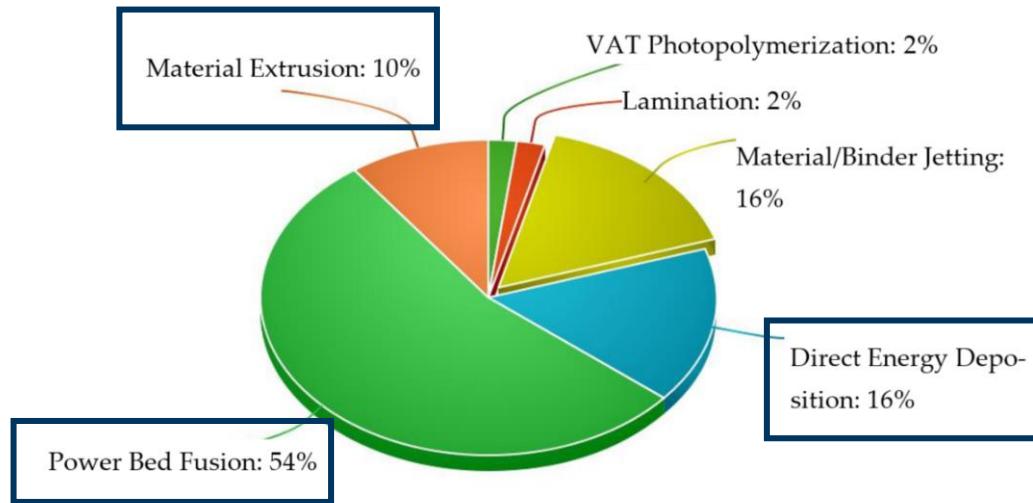
Armstrong, Mark; Mehrabi, Hamid; Naveed, Nida (2022): An overview of modern metal additive manufacturing technology. In: *Journal of Manufacturing Processes* 84, S. 1001–1029. DOI: [10.1016/j.jmapro.2022.10.060](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.10.060).

VERFAHREN - Prozessschritte

Prozessschritte nach VDI 3405

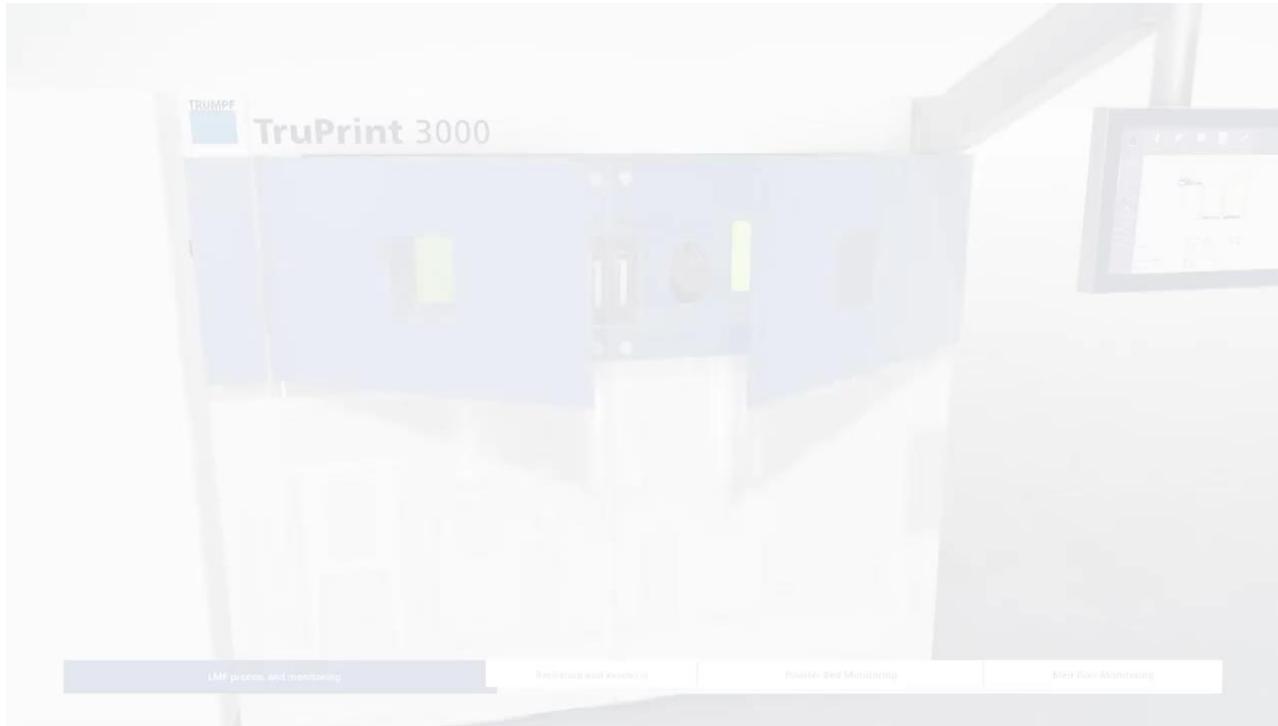


VERFAHREN – Relevanz der Verfahren



Vafadar, Ana; Guzzomi, Ferdinando; Rassau, Alexander; Hayward, Kevin (2021): Advances in Metal Additive Manufacturing: A Review of Common Processes, Industrial Applications, and Current Challenges. In: *Applied Sciences* 11 (3), S. 1213. DOI: 10.3390/app11031213

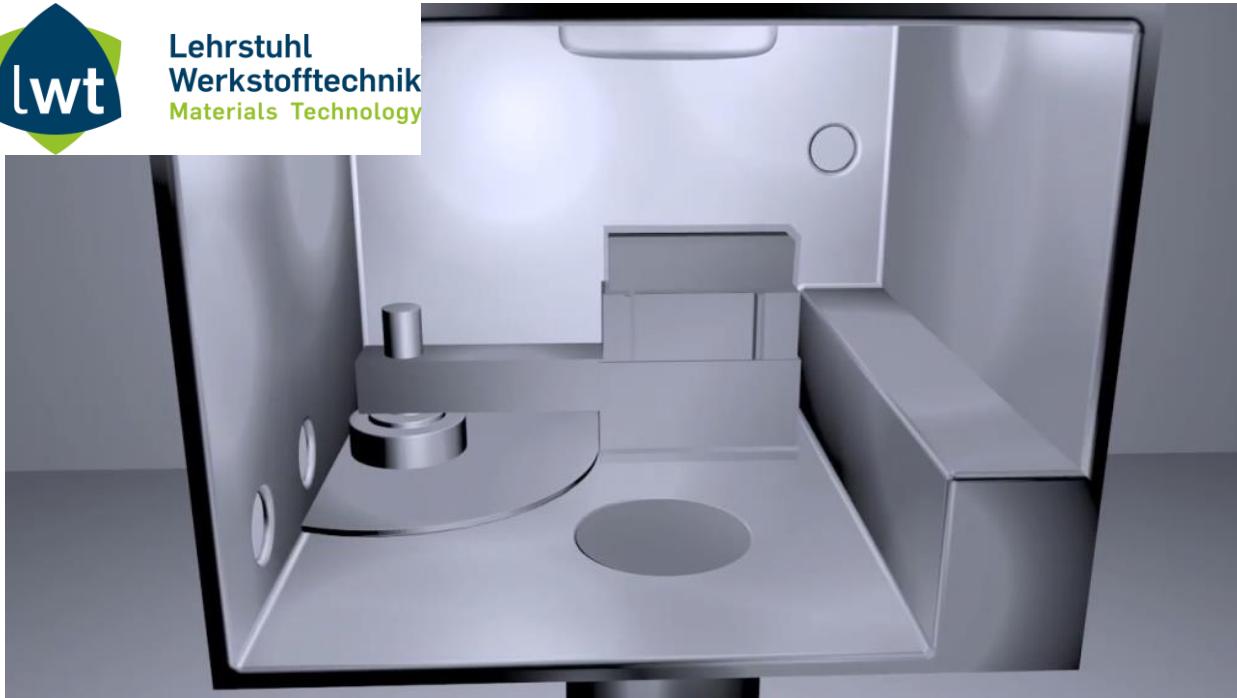
VERFAHREN – PBF-LB/M



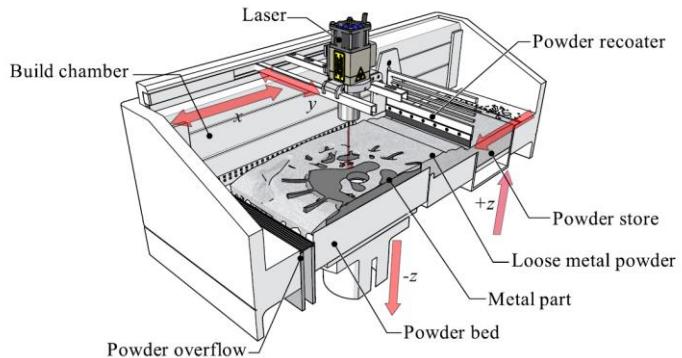
VERFAHREN – PBF-LB/M



Lehrstuhl
Werkstofftechnik
Materials Technology



VERFAHREN – PBF-LB/M



Synonyme: SLM

Kategorie: Powder Bed Fusion

Werkstoffe: schweißgeeignete Metalle und Metalllegierungen in Pulverform

Bauteilqualität/Genauigkeit/Oberflächen: rau Oberfläche

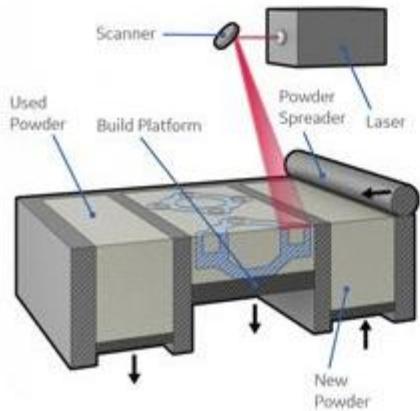
Aufbaurate: bis $25 \text{ cm}^3/\text{h}$; ca. 100 bis 200 g/h

Anwendungsbereich: Rapid Tooling, Rapid Manufacturing

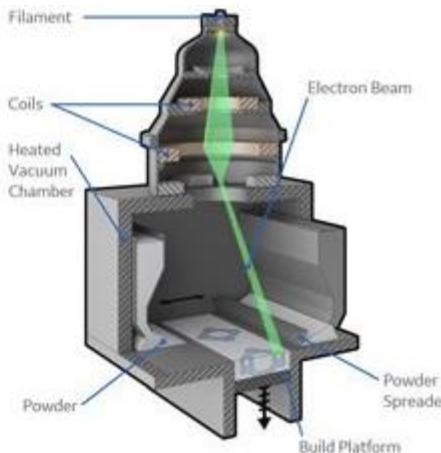
Besonderheiten: Druck auf Bauplattform wegen Warping, Legierungen über Pulvermischung möglich

VERFAHREN – PBF-LB/M vs. PBF-EB/M

PBF-LB/M



PBF-EB/M

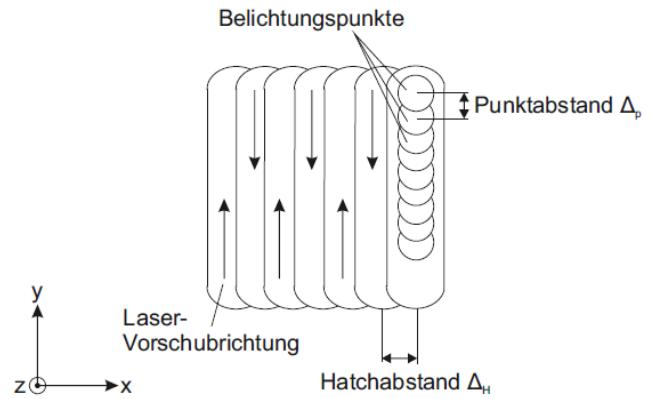
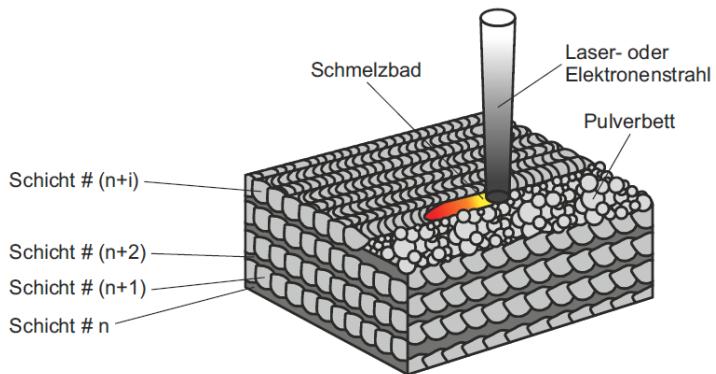


Schutzgas (Argon oder Stickstoff)

- Interaktion von Werkstoff und Prozessatmosphäre
- Abdampfen von Metallen im Vakuum
- Reaktion/Aufnahme von N im Schutzgas
- Bildung von Ar- oder N₂-Poren möglich

Vakuum

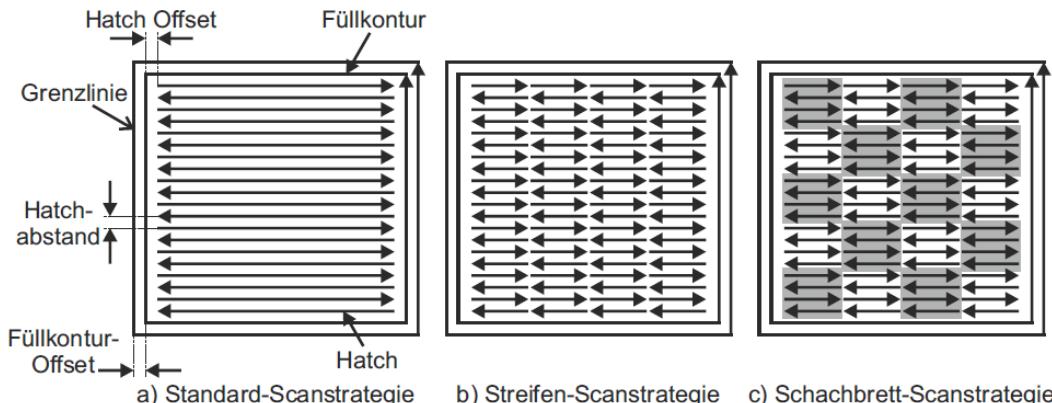
VERFAHREN – PBF-LB/M



Dissertation Geenen, 2018

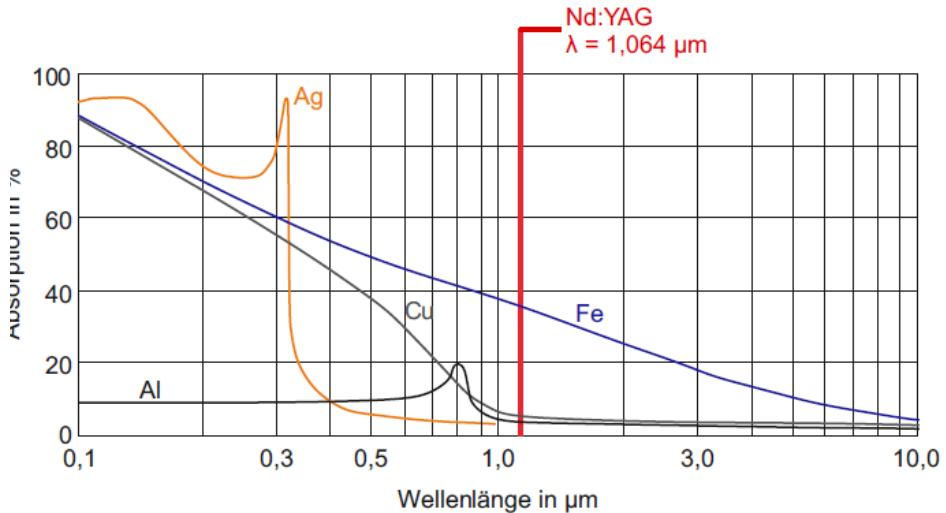
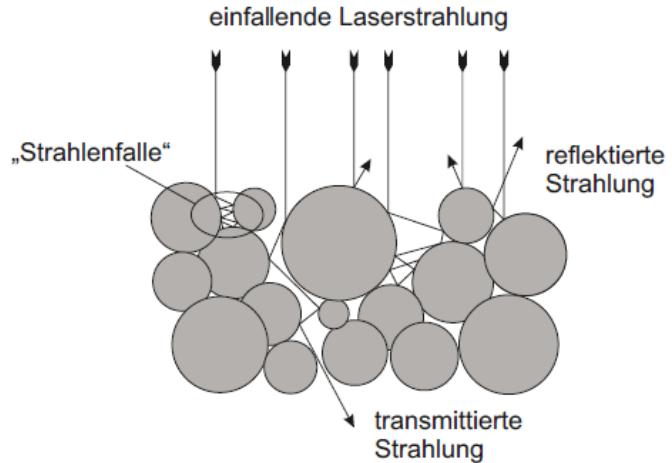
VERFAHREN – PBF-LB/M

Belichtungsstrategie (auch Scan- oder Rasterstrategie genannt)



- Viele weitere Strategien möglich
- Meist Rotation der jeweiligen Strategie nach jeder Schicht

VERFAHREN – LASER-Pulver-Interaktion



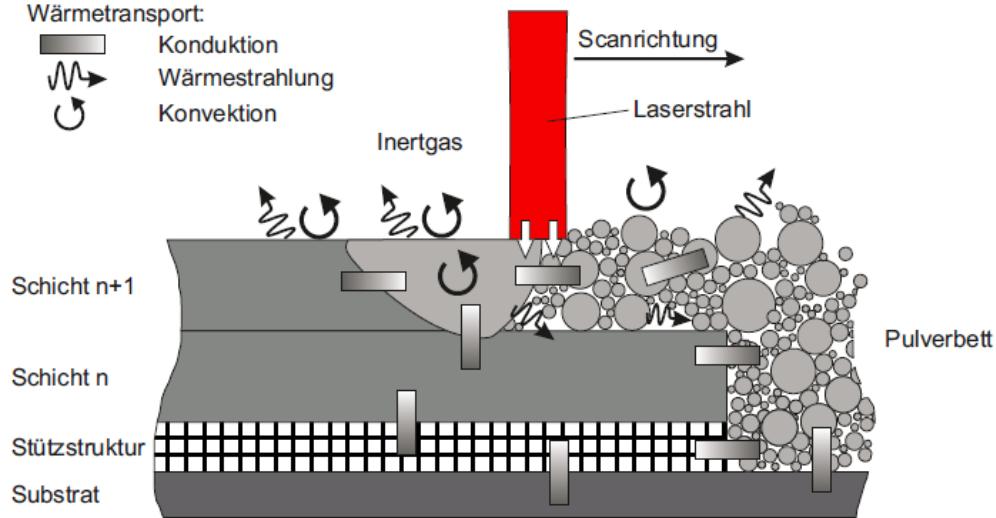
VERFAHREN – PBF-LB/M Temperaturbedingung

Wärmeströme:

→ Absorbierte Laserenergie

Wärmetransport:

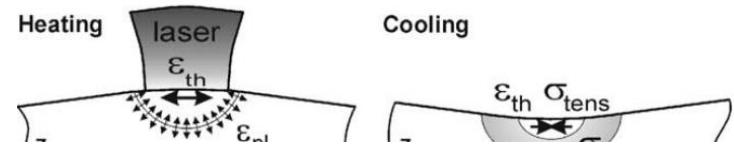
█ Konduktion
→ Wärmestrahlung
⟳ Konvektion



- Schnelle Abkühlung
- Hohe örtliche Temperaturgradienten
- Zyklische Wiedererwärmung
- Wärmeaufstau im Prozess
- Lokaler Einfluss der Bauteilgeometrie auf Abkühlung
 - Pulverbett = Isolator
 - Wärmeabfuhr über Stützstrukturen

VERFAHREN – PBF-LB/M

- Lokal hoher Temperaturgradient
- Volumenschwund durch Erstarrung und Abkühlung
- Temperaturverteilung abhängig von
 - Laserleistung
 - Zeitlicher Abstand zwischen benachbarten Scans
 - Wärmeleitung
 - Stützstrukturen
 - verdichtetes Material
 - Pulverbett

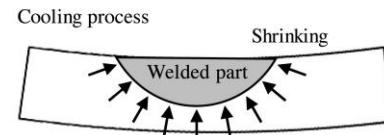
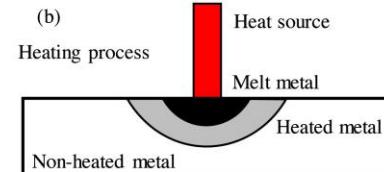


Hohe thermische Eigenspannungen → Verzug und oder Risse

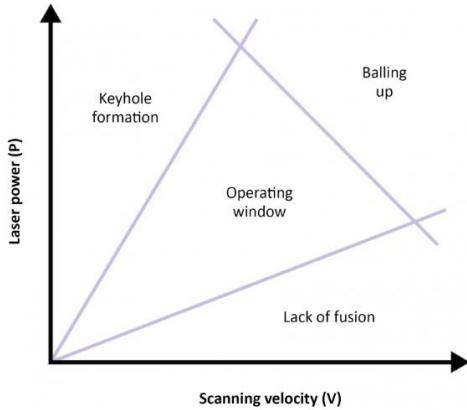
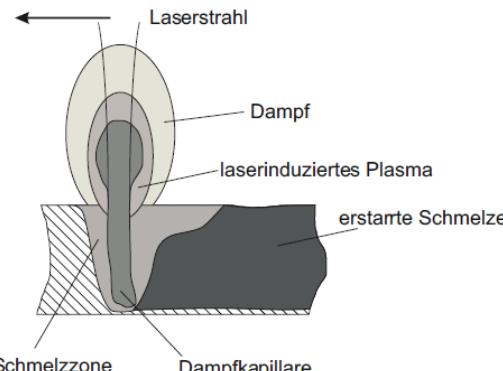
VERFAHREN – PBF-LB/M

- Lokal hoher Temperaturgradient
- Volumenschwund durch Erstarrung und Abkühlung
- Temperaturverteilung abhängig von
 - Laserleistung
 - Zeitlicher Abstand zwischen benachbarten Scans
 - Wärmeleitung
 - Stützstrukturen
 - verdichtetes Material
 - Pulverbett

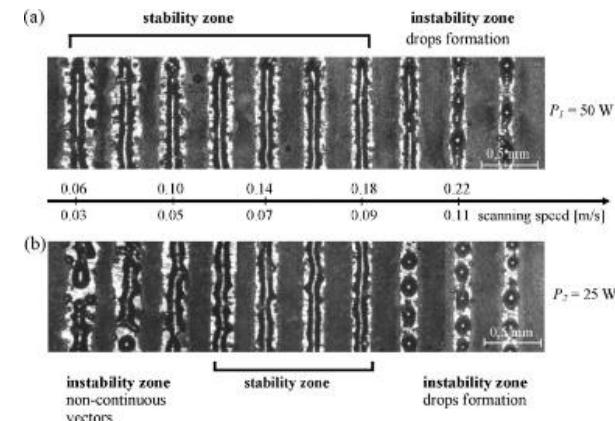
Verzug im Prozess → „Warping“ – Abbruch des Prozesses



VERFAHREN – LASER-Pulver-Interaktion

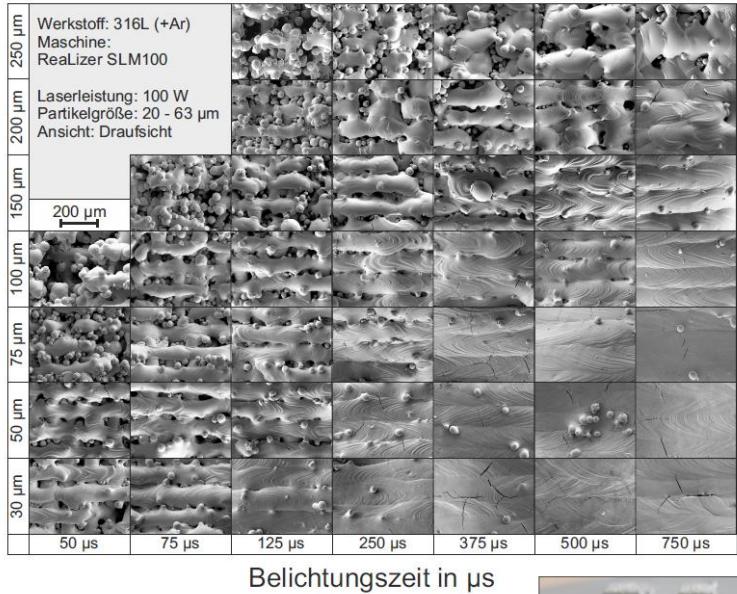


- **Balling (Kugelbildung)**
- **Eigenspannungen/Risse**
- **Poren**
- **Verzug**
- **(Kalt-)Risse insb. bei harten Legierungen (Martensit)**

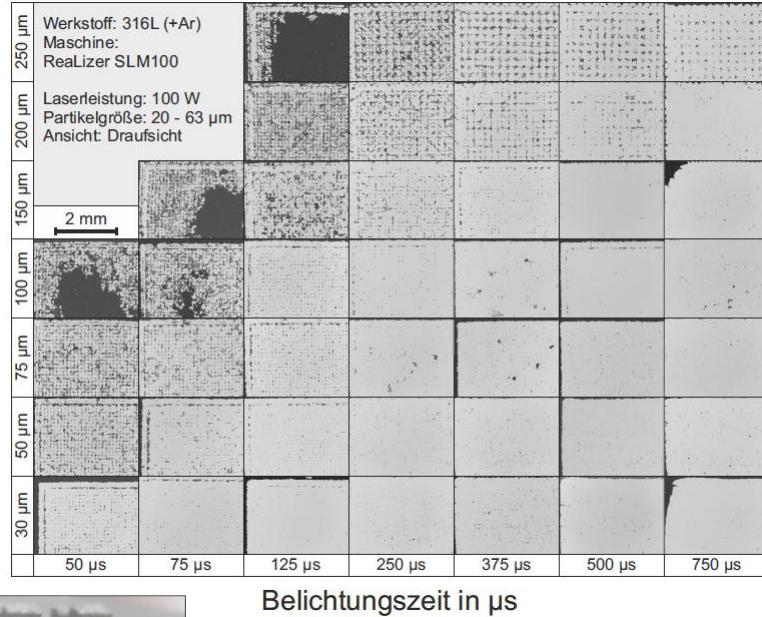


VERFAHREN – PBF-LB/M Parameterstudien

Punktabstand in μm



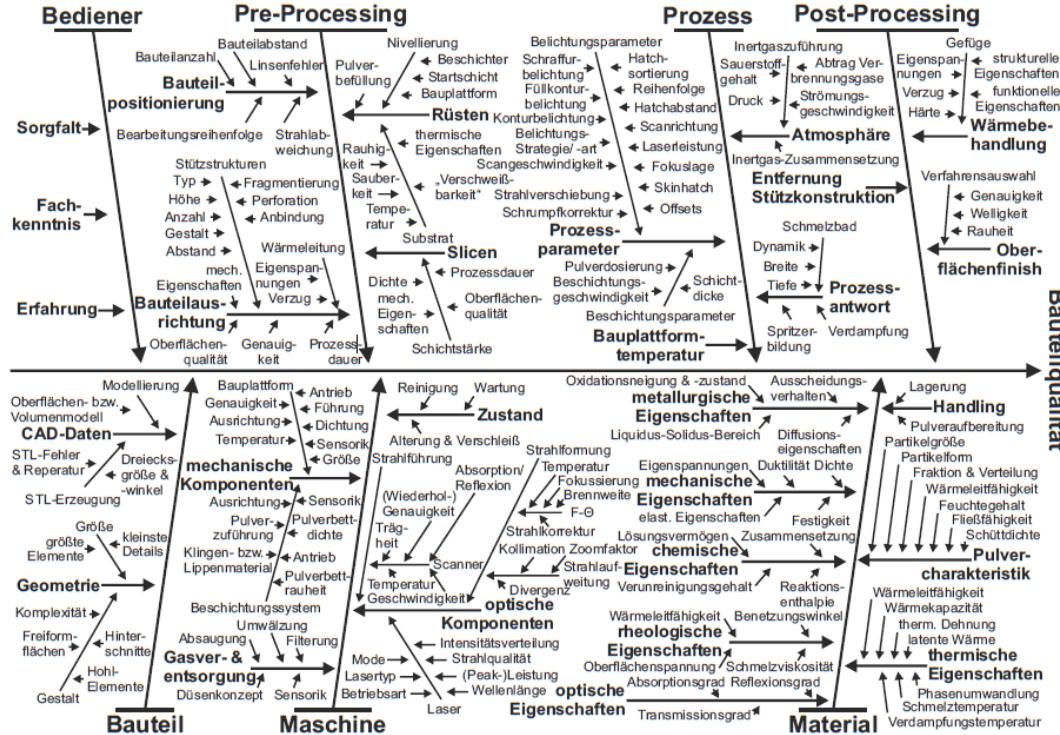
Punktabstand in μm



Dissertation Geenen, 2018

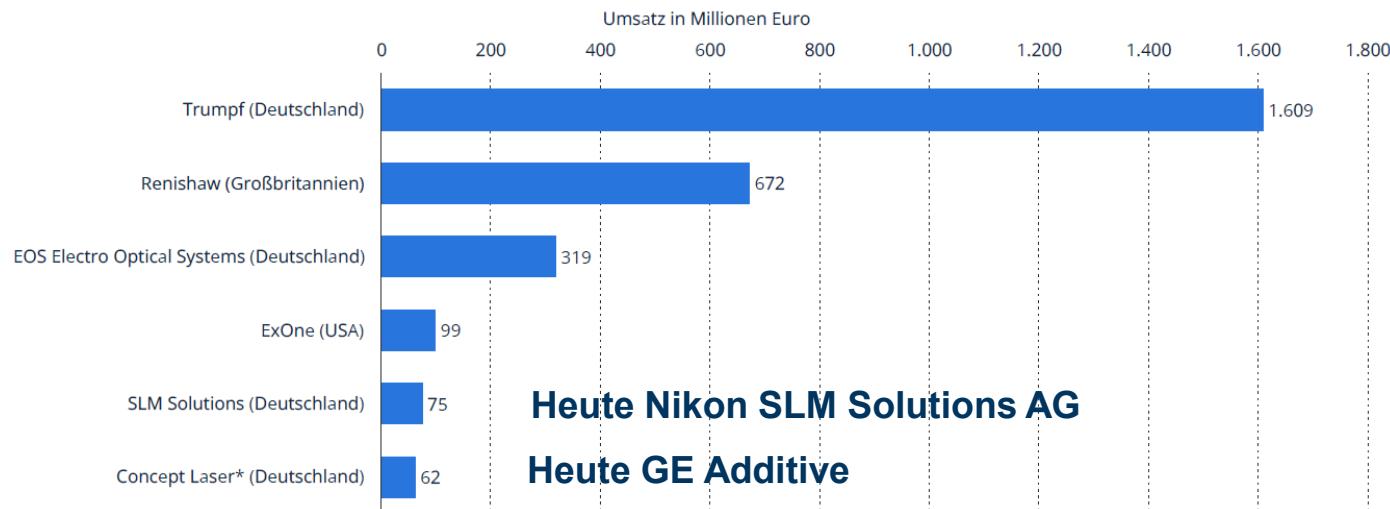


VERFAHREN – PBF-LB/M



VERFAHREN – PBF-LB/M

Additive Metallfertigung - Wichtige Systemhersteller weltweit nach Umsatz 2021

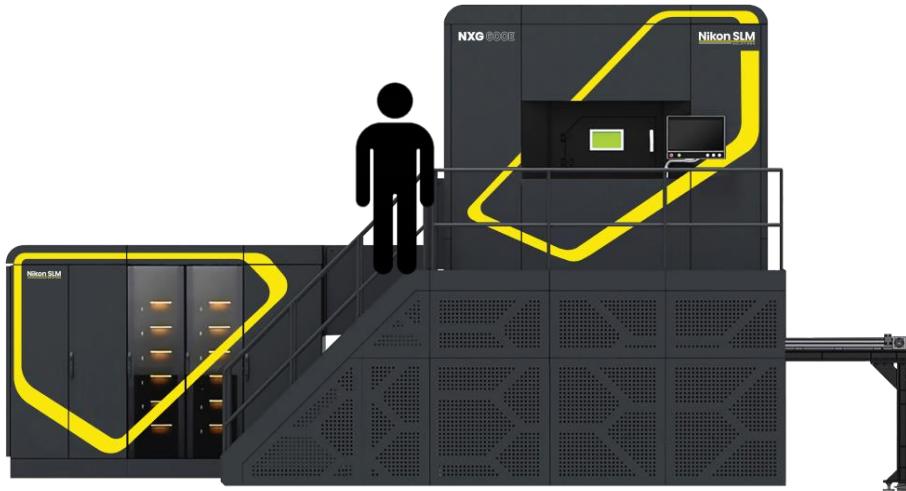


Statista, Additive Fertigung Report, 2023

VERFAHREN – PBF-LB/M

Anlagen-technische Unterschiede:

- LASER-Leistung (heute ca. 400 – 700 W)
- Multi-LASER-Systeme
- Vorheizen der Bauplattform (heute 200 °C)
- Auflösung des LASER
- Integrierter, geschlossener Pulverkreislauf
- Automatische Pulveraufbereitung
- Größe der Bauplattform
- Art der Pulverzuführung
- Art der Inertgasführung



Quelle: NXG 600E <https://nikon-slm-solutions.com/de/>

- 12 x 1000 W Laser
- 600 x 600 x 1500 mm Bauraum

VERFAHREN – DED-LB/M

Synonyme: LMD, LENS, EBAM, LBMD

Kategorie: Directed Energy Deposition

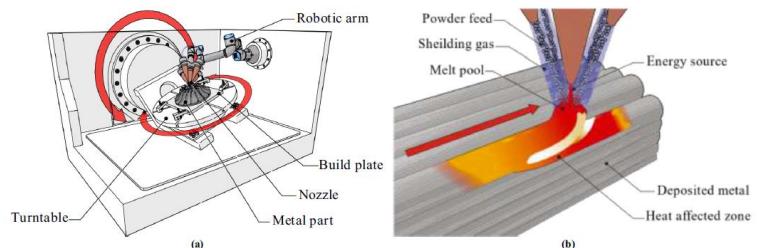
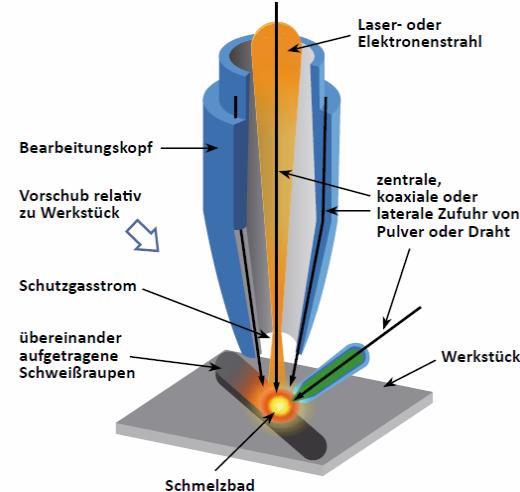
Werkstoffe: schweißgeeignete Metalle und Metalllegierungen, keramische Verstärkungspartikel

Bauteilqualität/Genauigkeit/Oberflächen: Schichten deutlich zu erkennen, geringe Genauigkeit

Aufbaurate: hoch (100-1500 g/h)

Anwendungsbereich: Rapid Tooling, Rapid Manufacturing mit Nachbearbeitung

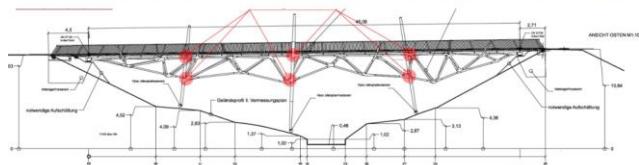
Besonderheiten: Aufbau von Freiformflächen möglich, schichtweise Materialvariationen umsetzbar



VERFAHREN – DED-LB/M



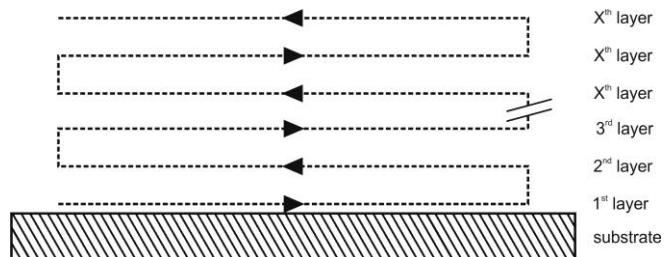
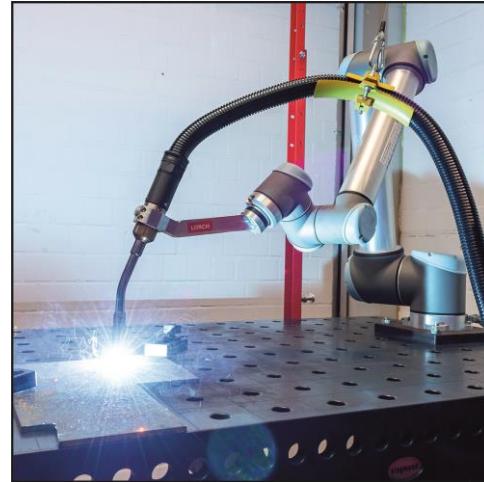
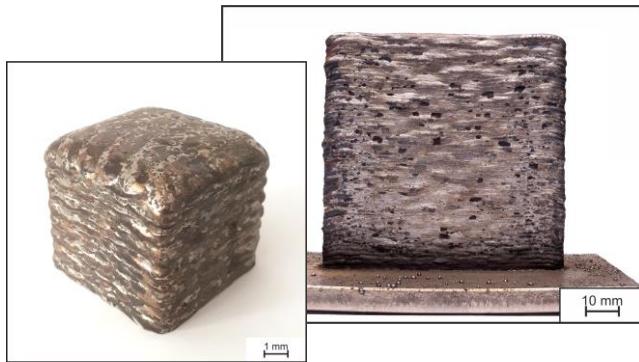
EXAFUSE aus Bochum



<https://meltio3d.com/>

VERFAHREN – DED-Arc/M

- DED-Arc / WAAM Setup
 - 6-Achs UR10 Roboter
 - Lorch RoboMIG S5 Schweißstromquelle



VERFAHREN – Vergleich

	PBF-LB/M	DED-LB/M	DED-Arc/M
Bauraum	300x300x300	1000 x 1000 x 1000 bis 50000 x 50000 x 30000	
Auftragsrate	100 g/h	1000 g/h	1.500-10.000 g/h
Genauigkeit	0,010 mm	0,1 mm	1-2 mm
Material	Pulver	Pulver und Draht	Draht (Massiv- und Fülldraht)
Partikelgröße	20-60 µm	40-150 µm	-
Draht- durchmesser	-	-	1 - 3 mm
Schichthöhe- und Breite	50 µm 50 µm	100 – 1.500 µm 250 – 4.500 µm	1.000 - 3000 µm 5.000 - 10.000 µm

VERFAHREN – MEX

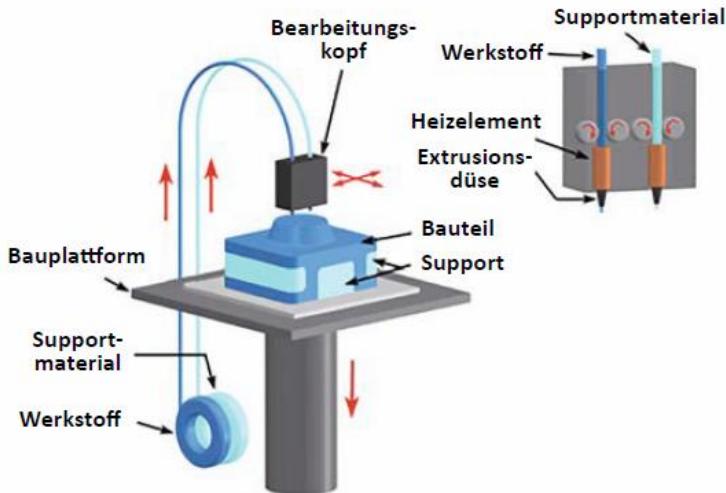


Abbildung 3-3: Strangefilamentation (FDM™) (Quelle: CustomPartNet LLC)

Synonyme: FDM, FFF, Schmelzschichtung

Kategorie: Material Extrusion

Werkstoffe: Filamente aus amorphen oder teilkristallinen Thermoplasten

Bauteilqualität/Genauigkeit/Oberflächen:

Schichten deutlich zu erkennen, fehleranfällig

Aufbaurate: mittel - hoch

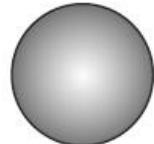
Anwendungsbereich: Rapid Prototyping, (Rapid Tooling)

Besonderheiten: günstigstes Prinzip, großer Hobbybereich, gefüllte Filamente, verstärkte Bauteile

VERFAHREN – Vergleich Pulver vs. Draht

Anforderungen:

- Keine Satellitenbildung
- Keine Agglomerate
- Geringe Kontamination (O_2 , Feuchtigkeit)
- **Gute Fließfähigkeit**



Fehlerfrei



Partikel mit Spritzer



Satellitenbildung

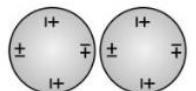
Einflussfaktoren und Charakterisierung:

- Partikelgrößenverteilung (Sieben, Sichten, Dynamische Bildanalyse, Laserbeugung)
- Morphologie (Dynamische Bildanalyse)
- Fließfähigkeit (Hall-Flow-Verfahren)
- Schüttdichte
- Feuchtigkeit
- Porosität (Metallographie)

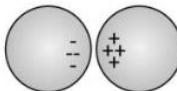
VERFAHREN – Pulveranforderungen

Partikel-Partikel-Interaktion und Haftung

Oberflächen- und Feldkräfte



van-der-Waals-Kräfte

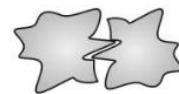


elektrostatische Kräfte

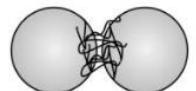


magnetische Kräfte

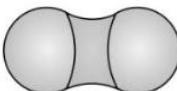
Formschluss



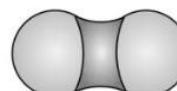
Materialbrücken



organische Makromoleküle



Flüssigkeitsbrücken

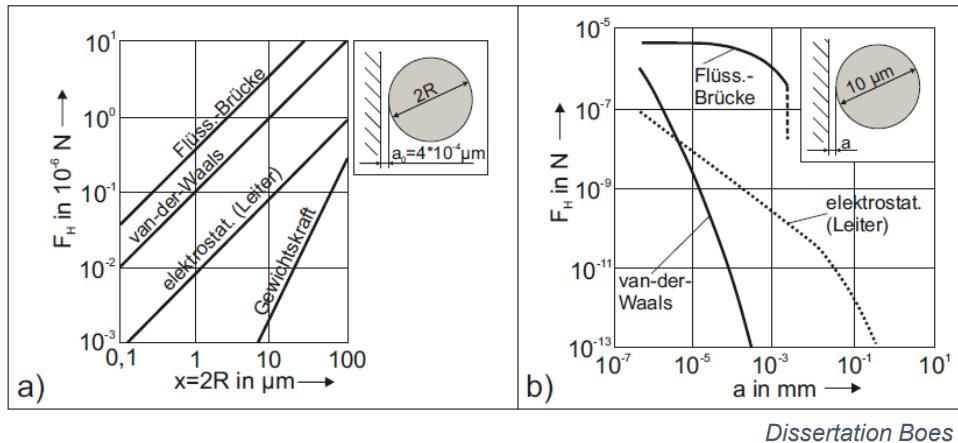


Versintern



chemische Reaktion

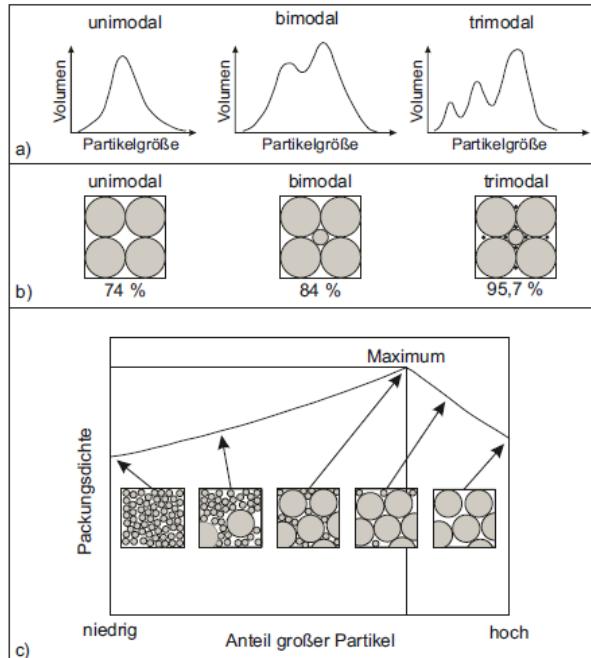
VERFAHREN – Pulveranforderungen



Haftkraft F_H Kräfte zwischen Partikel und Wand in Abhängigkeit der Partikelgröße x (a) sowie des Abstands zwischen Wand- und Partikeloberfläche a (b)

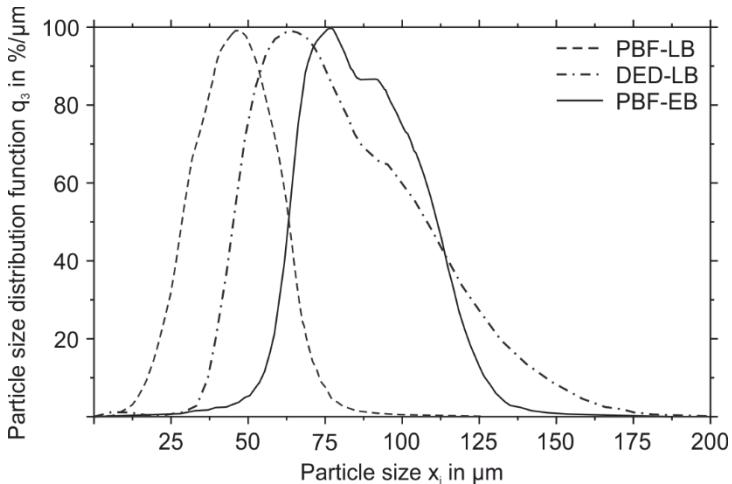
- Gewichtskraft nimmt stärker mit a zu als Haftkraft
→ Fließfähigkeit verbessert sich mit Partikelgröße
- Haftkraft sinkt mit Abstand
 - Rauigkeit?
 - Feiner Rauigkeit → Erhöht Fließfähigkeit
 - Grobe Rauigkeit → „Verhaken“ & Adhäsion

VERFAHREN – Pulveranforderungen



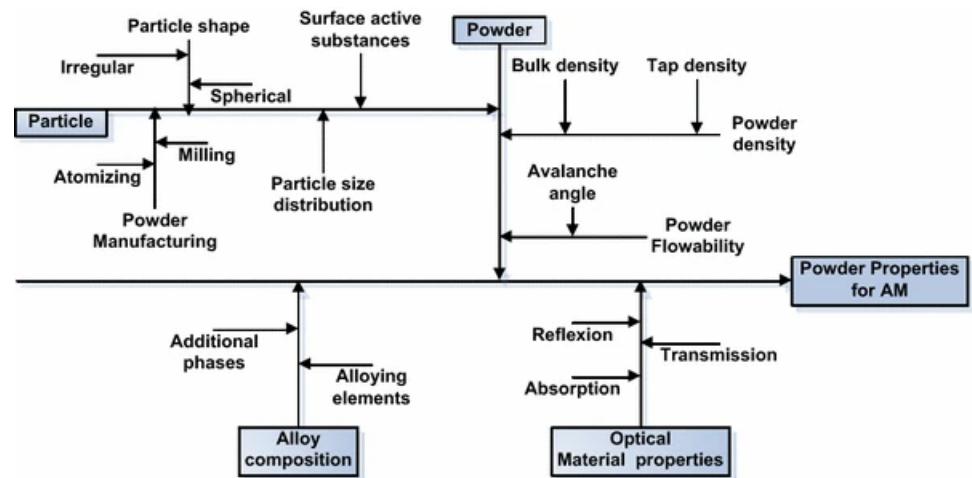
- Additivieren von Pulvern mit Nanopartikeln
- Erhöhen der Fließfähigkeit

VERFAHREN – Pulveranforderungen



Particle size distribution of the powder feedstocks used for PBF-LB, DED-LB, and PBF-EB.

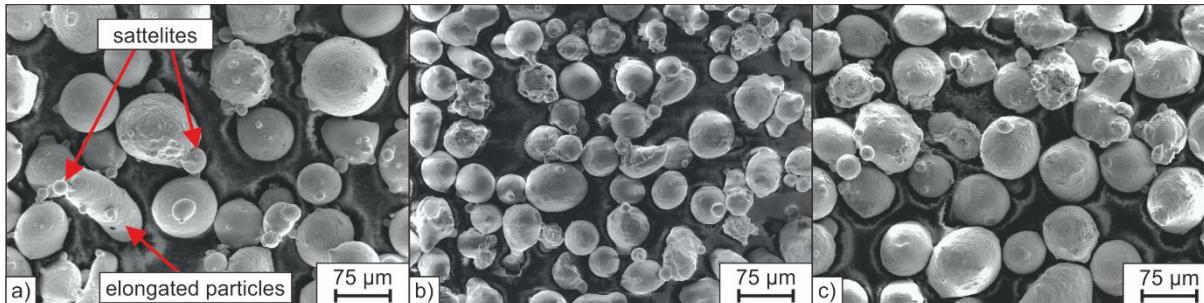
- Verschiedene Partikelgröße in verschiedenen Verfahren



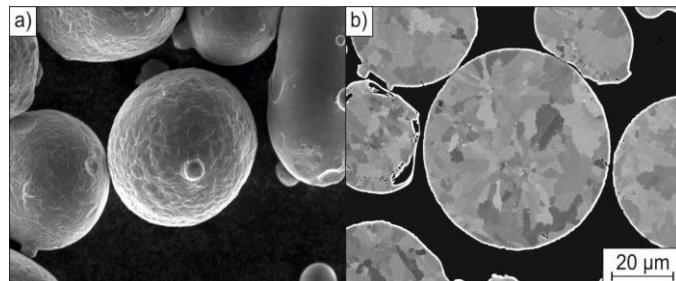
Ishikawa diagram with influencing parameters for metal powders

Spierings, A. B.; Voegtl, M.; Bauer, T.; Wegener, K. (2016): Powder flowability characterisation methodology for powder-bed-based metal additive manufacturing. In: *Prog Addit Manuf* 1 (1-2), S. 9–20. DOI: 10.1007/s40964-015-0001-4

VERFAHREN – Metallpulver vs. Draht



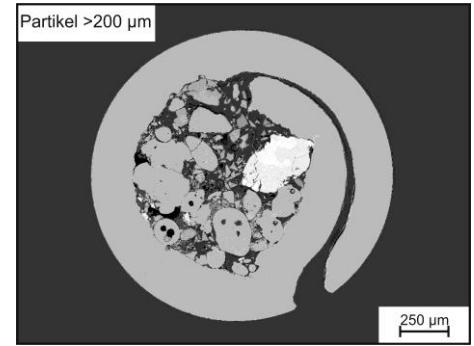
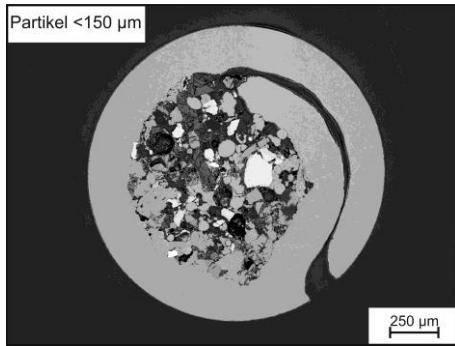
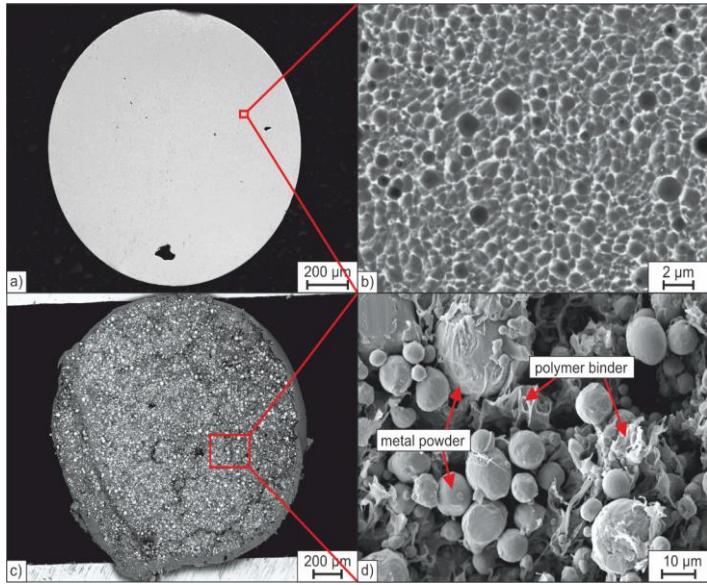
SEM micrographs of the starting powders used for a) PBF-EB, b) PFB-LB, and c) DED-LB.



SEM-micrographs of a) powder particles b) cross-sections of powder particles.

- Gasverdüste, sphärische, vorlegierte Pulver
- Satelliten und Irregularitäten lassen sich fertigungsbedingt nicht vermeiden
- Unterschiede der Partikelgröße in verschiedenen Verfahren

VERFAHREN – Metallpulver vs. Draht

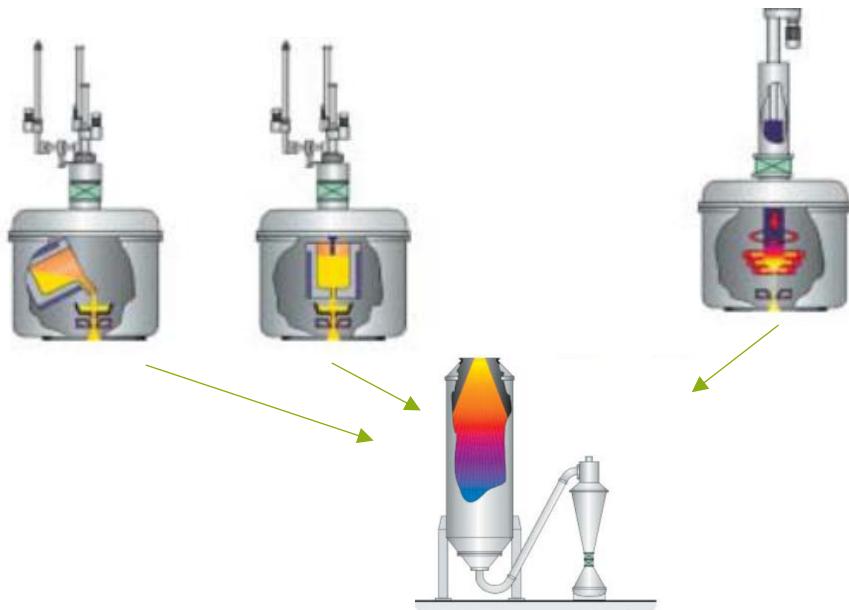


Verschiedene Fülldrähte für DED-LB/M oder DED-Arc/M

- Fülldrähte für hochlegierte, hochfeste Stähle
→ Kein Drahtziehen möglich
- Fülldrähte mit verschiedenen Mischungen aus Ferrolegierungen erhältlich
→ Anderes Abschmelzverhalten
- Polymerfilament mit Metallpulvern für MEX-Verfahren

VERFAHREN - Pulverherstellung

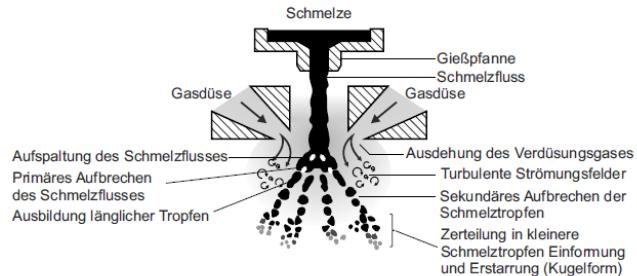
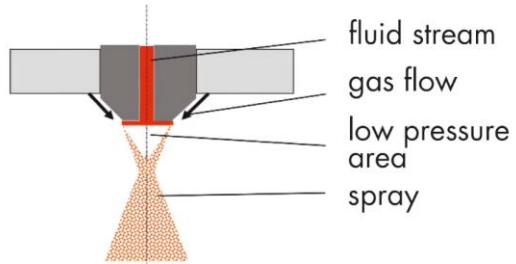
VIGA (vacuum induction gas atomization) EIGA (electrode induction gas atomization)



- VIGA = Tiegel-basiert (meist Al_2O_3 , teilweise MgO Tiegel und Feuerfestmaterial)
 - Legierungsbildung im Tiegel möglich
- EIGA = Tiegel-los
 - Für reaktive Metalle (wie Ti) zwingend notwendig
 - Aufwendiger, da vorlegierte Elektrode benötigt wird

VERFAHREN - VIGA

Close coupled nozzle



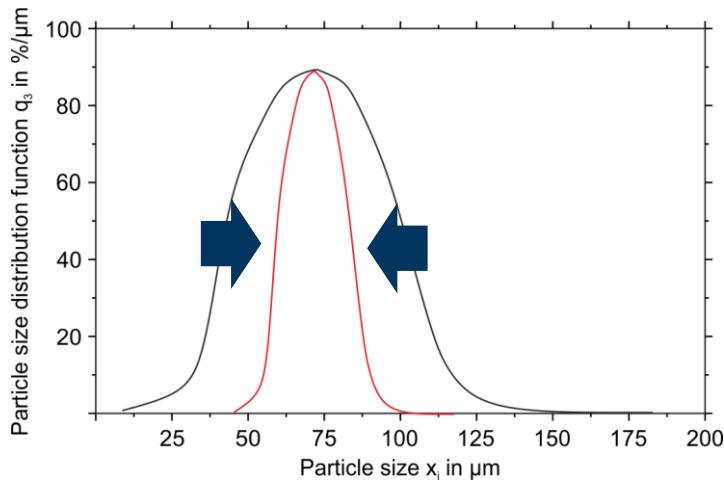
VERFAHREN - VIGA

Atomizer Cam 2023/11/15 11:43:29

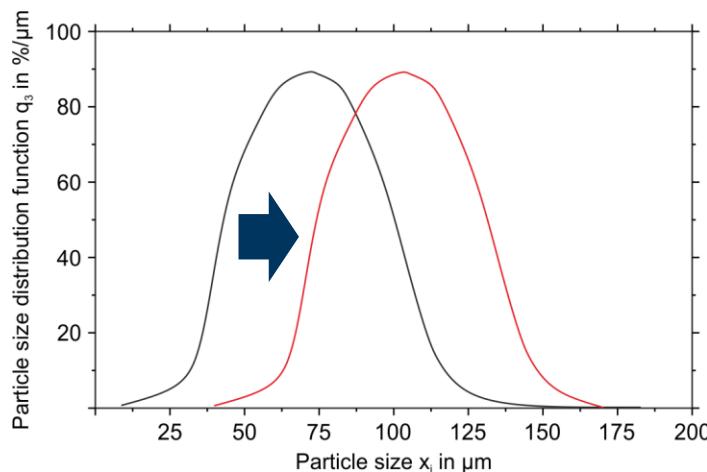


Können alle Legierungen mittels VIGA verdüst werden?

VERFAHREN – VIGA Prozessparameter



- Kleinerer Auslass
- Geringerer Schmelzefluss & langsamere Verdüsung
- Aber engere Partikelgrößenverteilung



- „Closed Coupled Düse“ → „Free Fall Düse“
- Sinkender Gasdruck
- Sinkende Gastemperaturen
- Erhöhung der Partikelgrößen über Druck, Temperatur und Gasdüse

VERFAHREN – Pulverfraktionierung und -charakterisierung



Kleinstschmelzofen

- 110 g Kleinstschmelzen
 - 2000 °C
 - - 1 bis 3 bar
 - Vakuum
 - Vibrationsgießen



Windsichter

- AC1000G
 - Schutzgas
 - Flexibel
 - 4 – 200 µm



Optische Partikelanalyse

- Sympatec QICPIC
 - Partikelgröße
 - Partikelform
 - 1,8 µm – 1252 µm
 - (bis 0,55 µm nass)



Vibrationssiebmaschine

- Retsch AS450 control

VERFAHREN – Legierungen für AM

Empfohlene Metalle für 3D-Drucke im Jahr 2017



VERFAHREN – Legierungen für AM

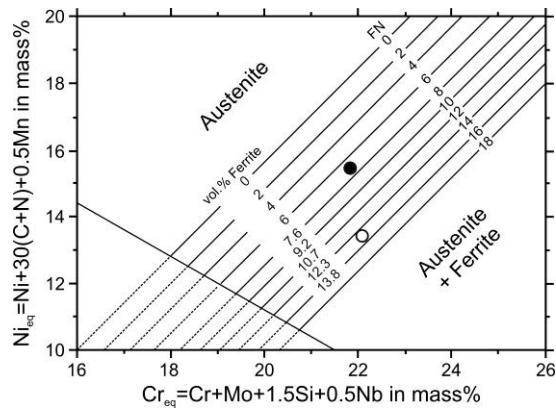
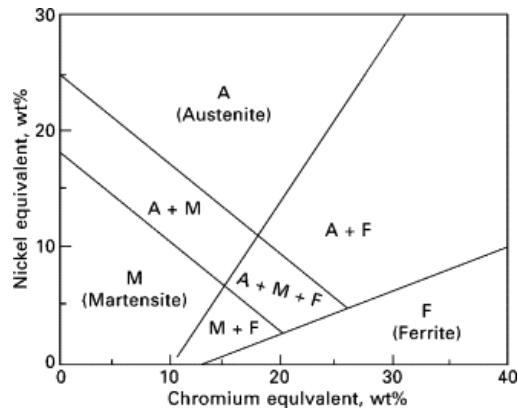
Rostfreie austenitische Stähle	316L
Ausscheidungshärtende Stähle	17-4PH (1.4542), M300 (1.2709)
Werkzeugstahl	H13
Alu	AlSi10Mg
	A205
Nickel-Legierung	IN718
	IN625
Titan-Legierung	Ti6Al4V
	Ti6242
Cobalt-Chrom-Legierung	MP1 (CoCrMo)
	MP2 (CoCrW)

VERFAHREN – Werkstoffanforderungen

- Schweißbarkeit von Stählen
- Schäffler und Schäffler-DeLong-Diagramm

$$\text{Ni equivalent} = \% \text{Ni} + \% \text{Co} + 30(\% \text{C} + \% \text{N}) + 25(\% \text{N}) + 0.5(\% \text{Mn}) + 0.3(\% \text{Cu})\%$$

$$\text{Cr equivalent} = \% \text{Cr} + 2\% \text{Si} + 1.5(\% \text{Mo}) + 5(\% \text{V}) + 5.5(\% \text{Al}) + 1.75(\% \text{Nb}) + 1.5(\% \text{Ti}) + 0.75 (\% \text{W}).$$



VERFAHREN – Werkstoffanforderungen

Beurteilung der Schweißbarkeit

- Kohlenstoffäquivalent (CET)
 - DIN EN 1011-2:2001-05
 - Schweißbar CET < 0,2
 - Werte in Ma.-%
- Berechnung von Martensitstart
 - Bspw: Barbier et. al.
 - $M_s < T_{prozess}$
- Für Werkzeugstähle relevant
- Vermeidung Kaltrissbildung

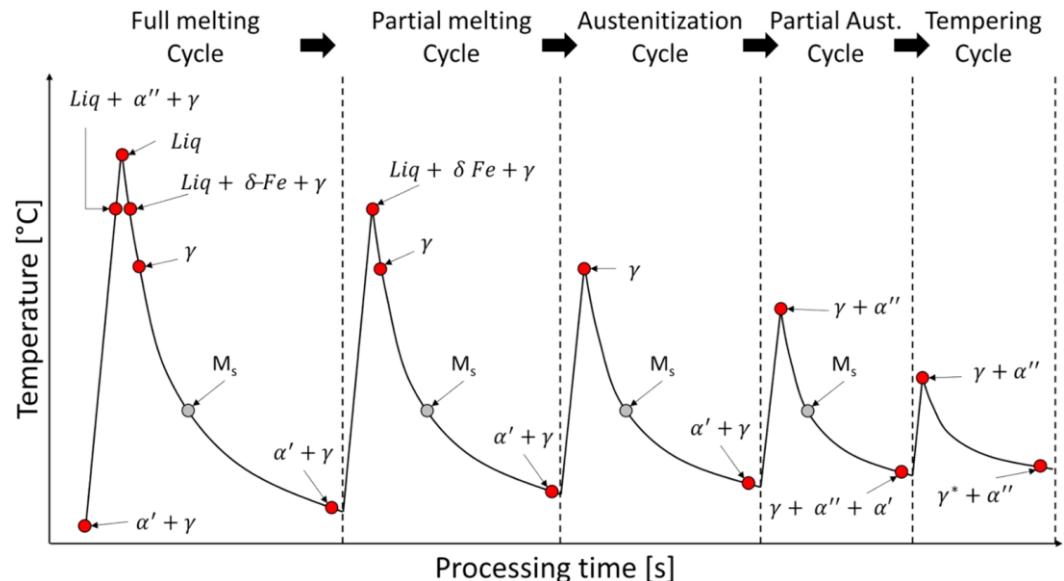
$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}$$

$$M_s = 545 - 601.2^*(1 - \text{Exp}(-0.868^*C\%)) - 34.4^*Mn\% - 13.7Si\% - 9.2Cr\% - 17.3Ni\% - 15.4Mo\% + 10.8V\% + 4.7Co\% - 1.4Al\% - 16.3Cu\% - 361Nb\% - 2.44Ti\% - 3448B\%$$

Barbier, David (2014): Extension of the Martensite Transformation Temperature Relation to Larger Alloying Elements and Contents. In: *Adv Eng Mater* 16 (1), S. 122–127. DOI: 10.1002/adem.201300116)

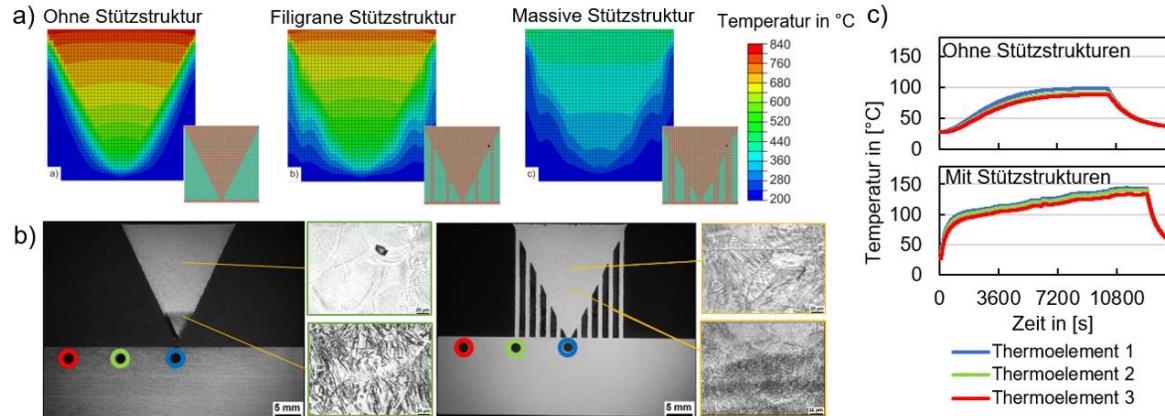
MIKROSTRUKTUREN - Werkzeugstahl

- Zyklischer Temperatureintrag
- Hier Martensitbildung im Prozess

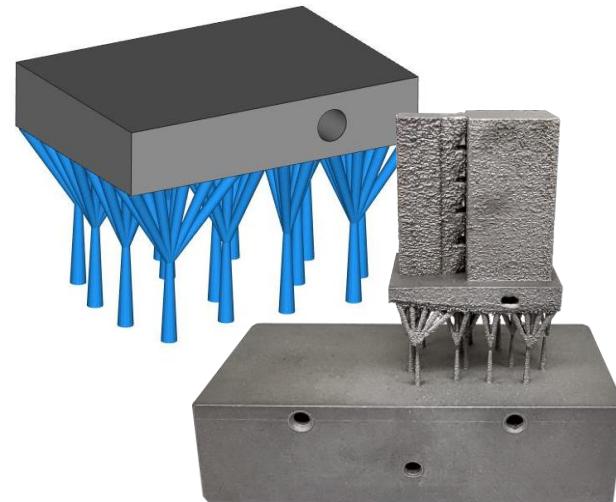


De F. Silveira et al. – <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103408>

VERFAHREN – PBF-LB/M Wärmestau



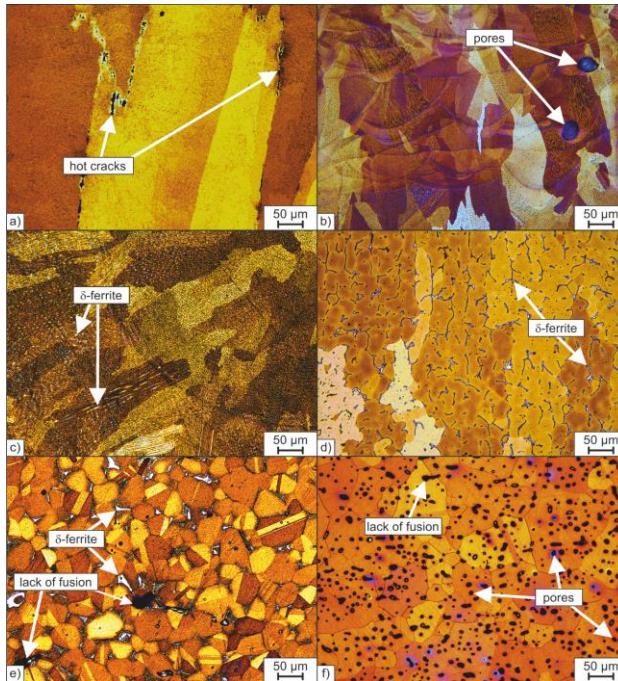
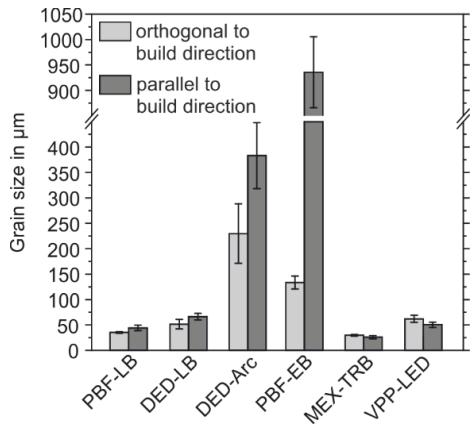
Thermisch
isolierende
Stützstrukturen



- Gezielte Nutzung des Wärmestau möglich?

MIKROSTRUKTUREN

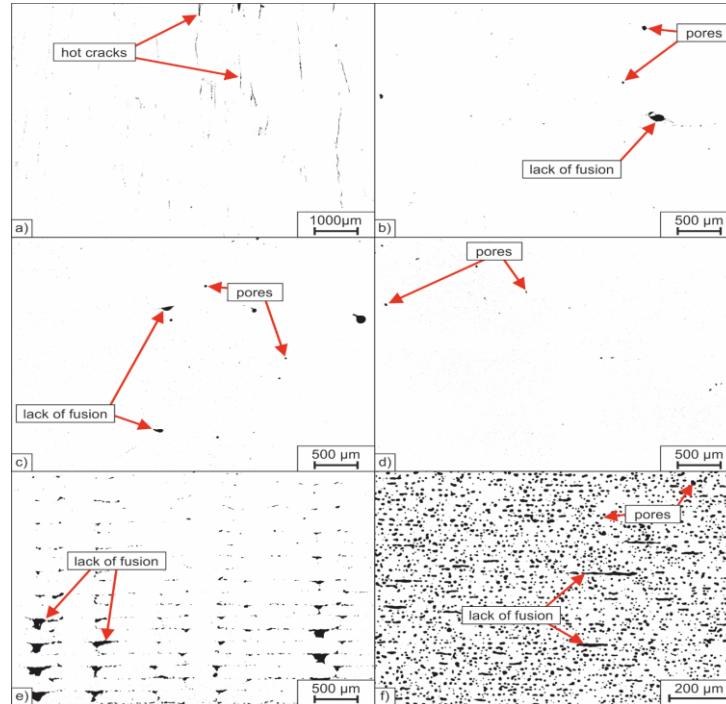
- Austenit: 1.4404, 316L, X2CrNiMo17-12-2
- Klarer Einfluss der Fertigungsverfahren auf Gefüge



a) PBF-EB, b) PBF-LB, c) DED-LB, d) DED-Arc, e) MEX-TRB, and f) VPP-LED etched with Beraha II solution. Ferrite appears white, austenite grains appear brown to yellow. Build direction is vertical.

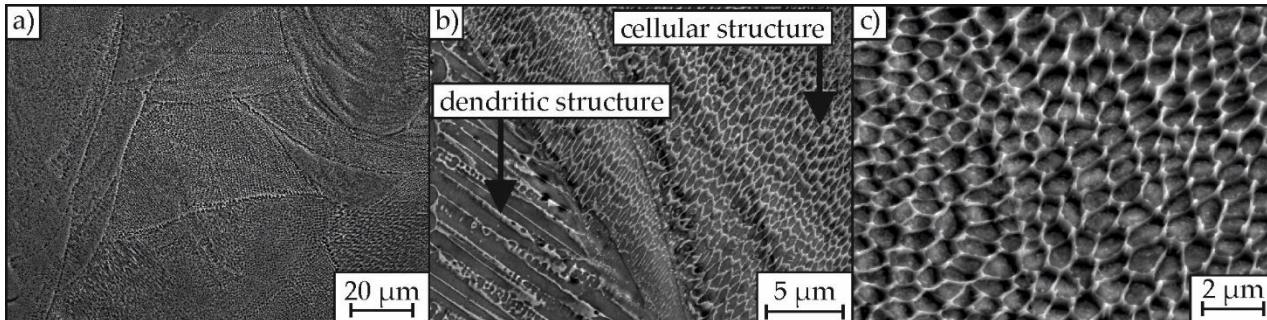
MIKROSTRUKTUREN

- Austenit: 1.4404, 316L, X2CrNiMo17-12-2
- Klarer Einfluss der Fertigungsverfahren auf Gefüge
- ...und Defekte



Binarized optical micrographs of the 316L samples produced by a) PBF-EB, b) PBF-LB, c) DED-LB, d) DED-PB, e) MEX-TRB, and f) VPP-LED. Build direction is vertical.

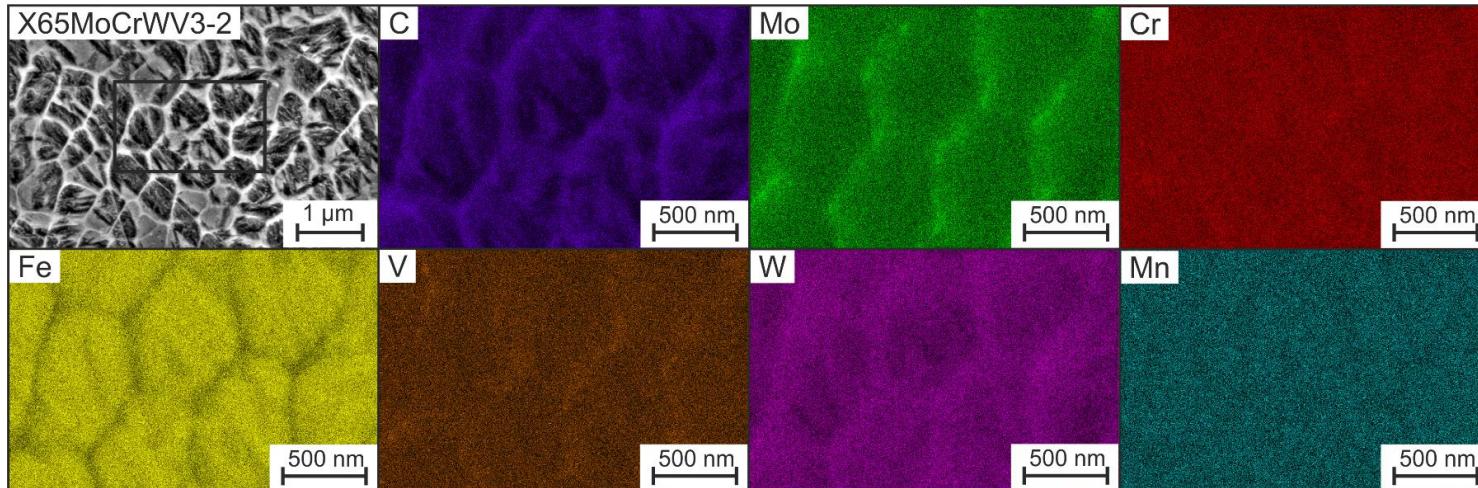
MIKROSTRUKTUREN



SEM-micrographs of the as-built microstructure of PBF-LB/M HIA steel, built with the optimum parameters. a) melt line structure on the mesoscale, b) adjacent regions with dendritic and cellular substructure, respectively, c) cellular substructure on the microscale.

- Fein zellulare Gefüge
- Ausgeprägte Mikroseigerungszellen

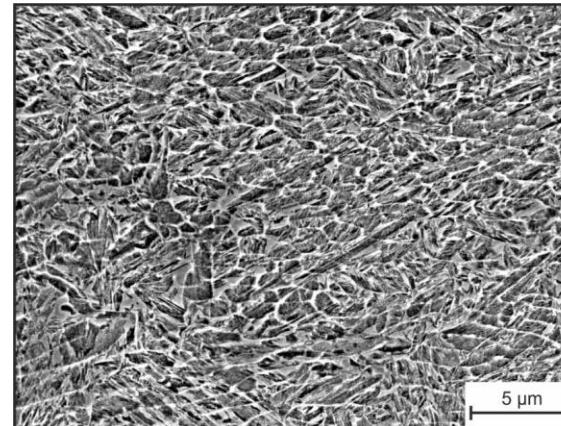
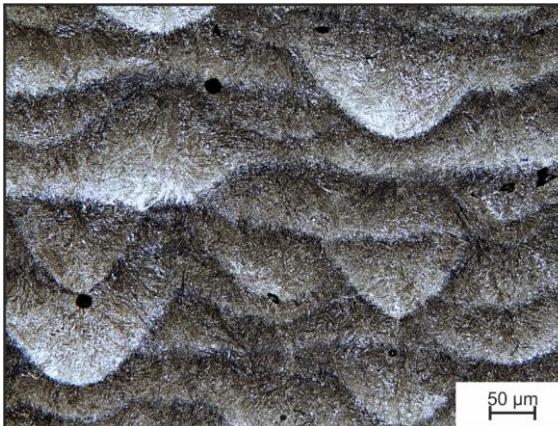
MIKROSTRUKTUREN - Werkzeugstahl



- PBF-LB/M mit Bauplattenvorwärmung über M_s → Keine Defekte
- Seigerung der „schwereren“ Elemente in Zellsäume → Zelle-Saum-Struktur

MIKROSTRUKTUREN - Werkzeugstahl

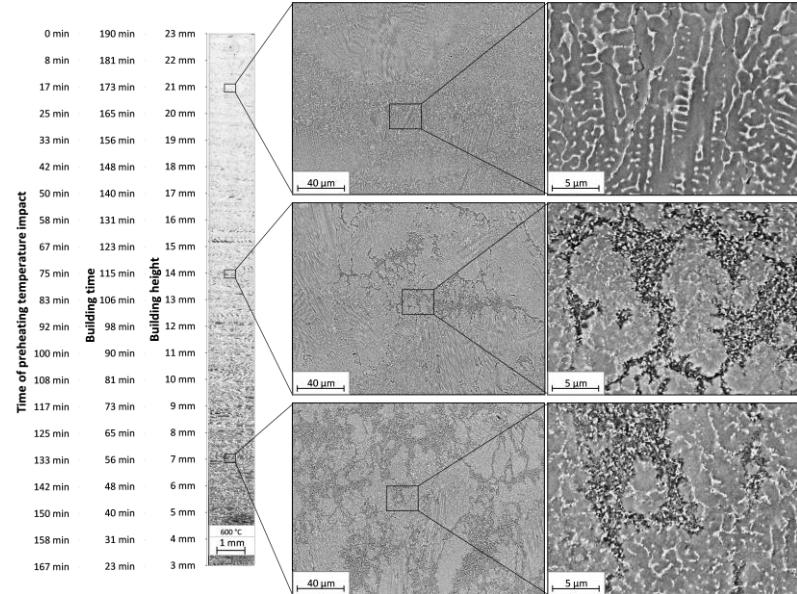
- Vorversuche zur Verarbeitung von 1.2714 (55NiCrMoV7) mittels PBF-LB/M ohne Vorwärmung



- Keine Kaltrisse
- Schmelzlinien einzelner Lagen sichtbar
- Geringe Porosität
- Zelle-Saum-Struktur
- Martensit mit Restaustenit

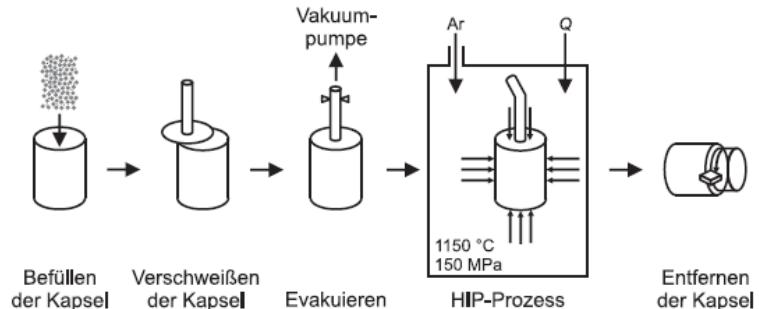
MIKROSTRUKTUREN - Werkzeugstahl

- PBF-LB/M von M2, 1.3343, HS6-5-2C
- 600 °C Vorheizung
- Gefügeveränderungen über die Bauhöhe



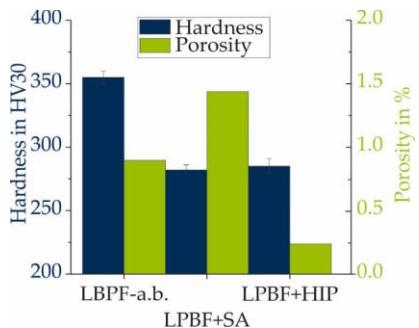
POST PROCESSING

- Heilen von Defekten durch HIP
- Temperaturen von 1050 bis ca. 1200 °C
- Druck von 100 bis 200 Mpa
- Bei geschlossener Porosität kein Kapseln nötig
→ AM-Bauteile können direkt in die HIP

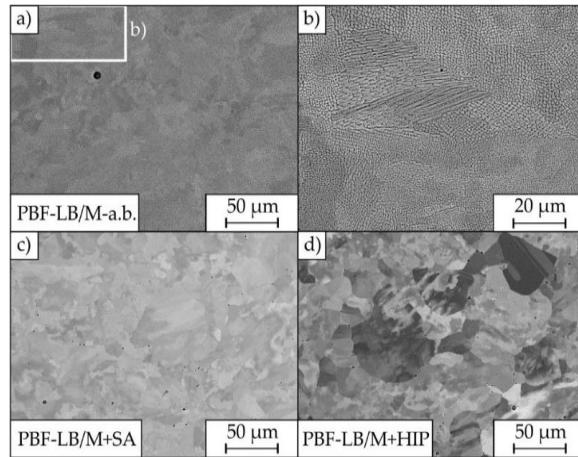


POST PROCESSING

- Heilen von Defekten durch HIP
- Schließen von Poren
- Gleichzeitige Gefügeveränderung
- Erholung und Rekristallisation
- Abbau der Mikroseigerungen
- Abbau der feinen zellularen Struktur
- Abnahme Härte und Festigkeit
- Zunahme Ermüdungsbeständigkeit & Zähigkeit

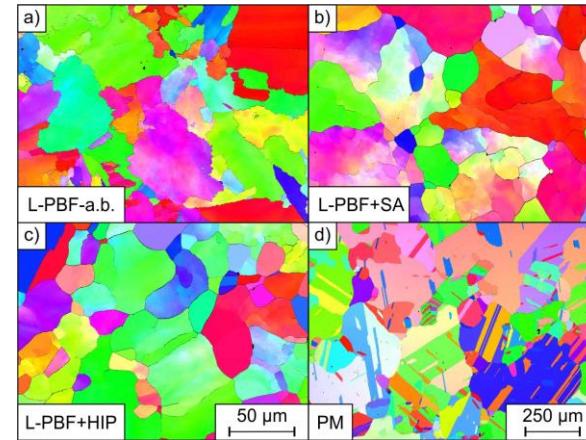
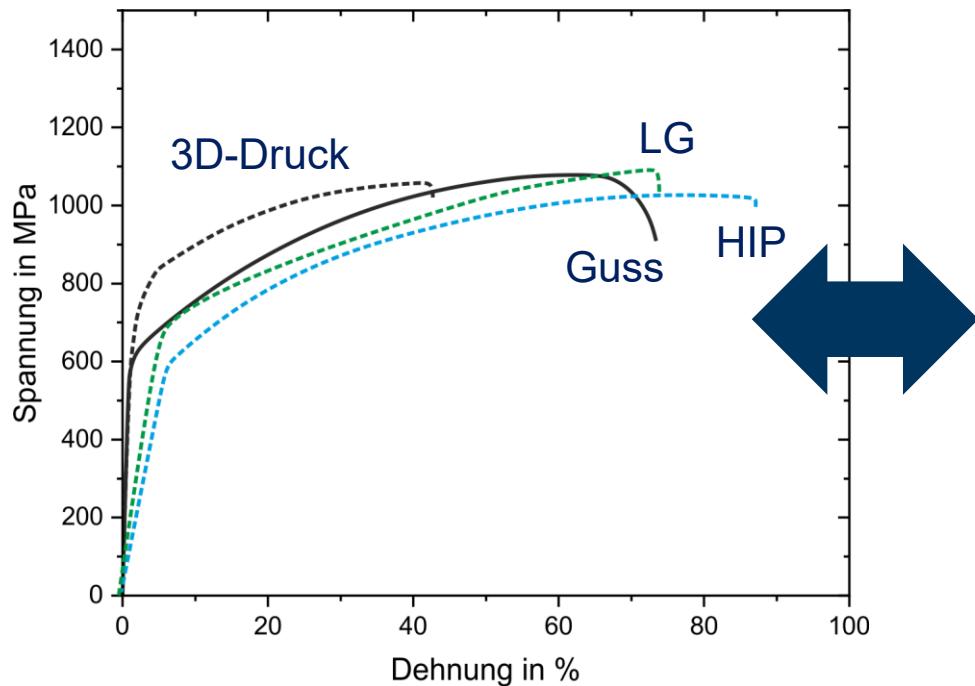


Hardness and porosity of the as-built and post-processed states of L-PBF HIA.



SEM-micrographs of the PBF-LB/M samples in as-built (a and b), solution-annealed (c) and hot-isostatically pressed (d) state.

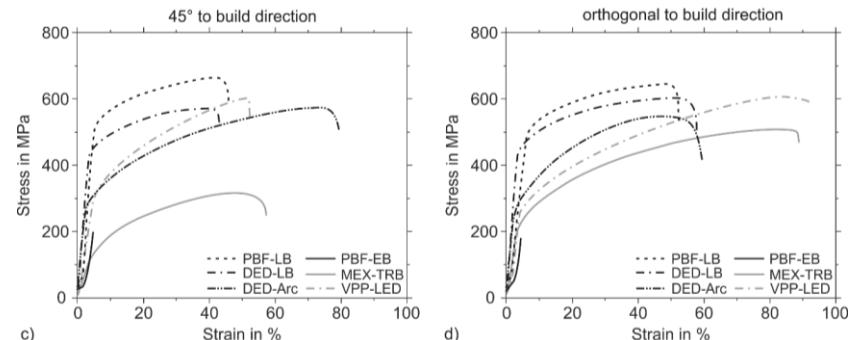
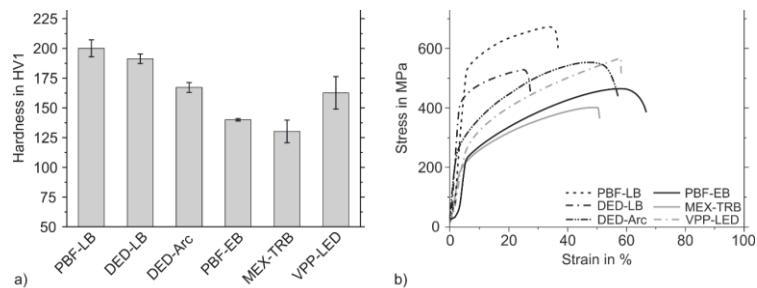
MIKROSTRUKTUREN - Eigenschaften



- WBH → Abnahme der Streckgrenze
- Gefügevergrößerung
- Abbau der Versetzungsdichte

MIKROSTRUKTUREN - Eigenschaften

- Ausgeprägte Anisotropie
- Unterschiede zwischen Verfahren



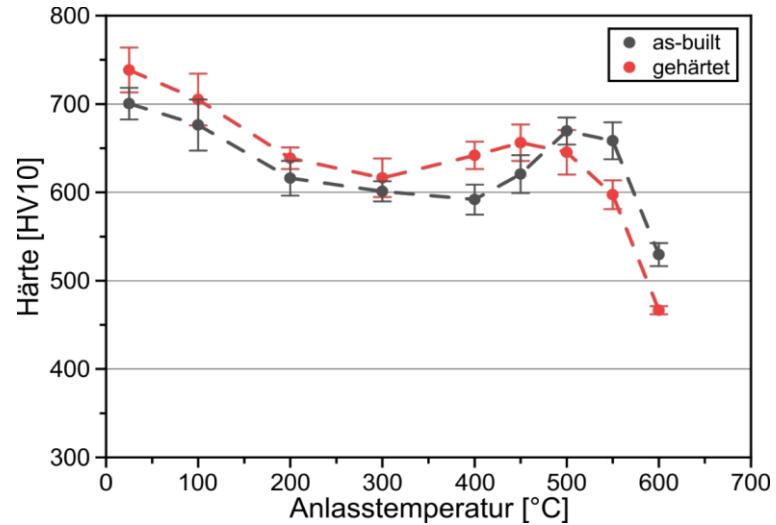
Mechanical properties of the additively manufactured 316L samples: a) Vickers hardness, b) tensile tests parallel to the build direction, c) tensile tests 45° to the build direction, and d) tensile tests orthogonal to the build direction.

MIKROSTRUKTUREN - Eigenschaften

Veränderungen des Härte-Anlass-Verhaltens von Werkzeugstählen

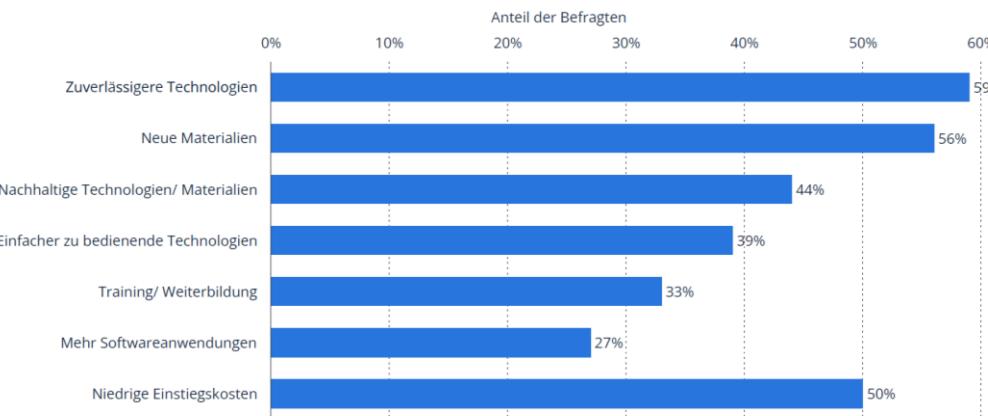
- Höherer Lösungszustand
- Temperatur-Historie?
- Verschiebung zu höheren Temperaturen

Anlassverhalten von 1.2343
(as-built vs. gehärtet)



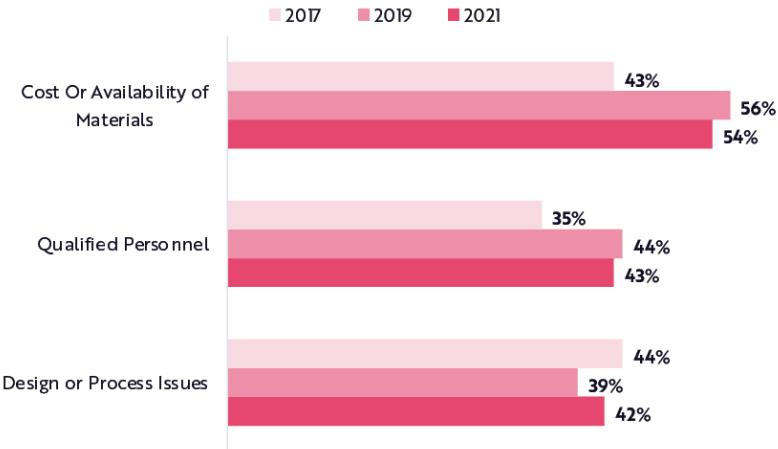
AUSBLICK – Forschungsbedarf?

Was braucht die 3D-Druckindustrie um zu wachsen?



Statista, Additive Fertigung Report, 2023

Top 3 Barriers To 3D Printing Adoption*
"What Prevents Your Company From Doing More 3D Printing
In Production Today?"

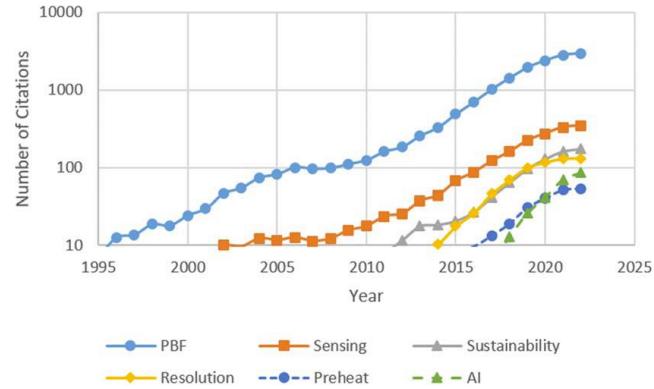


BIG IDEAS 2023, White Paper, ARK Investment Management LLC.

AUSBLICK – PBF-LB/M

Zukünftige Entwicklungen:

- Integration von AI
- Ausstattung mit erweiterter Sensorik
- Vorheizen der Bauplattform
- Verbesserung der Auflösung
- Erforschung von Nachhaltigkeitsaspekten
- Multilaser Systeme → Laser zum Vor- und Nachwärmen?
- Donut-shaped LASER-Intensity profiles
- Erforschung neuer Legierungen und Materialansätze
 - Pulvermischungen („Pulverbaukasten“)
 - In-Situ-Legieren
 - „Additivieren“ von Pulvern



Richard Rothfelder, A Brief History of the Progress of Laser Powder Bed Fusion, 2023 of Metals in Europe, DOI: 10.1115/1.4062788

BAUTEILE – PBF-LB/M



Novel titanium based alloy for better orthopaedic implants
<https://www.ntu.edu.sg/sc3dp>



Fräser aus Werkzeugstahl 1.2343

ZUSAMMENFASSUNG

- AM-Verfahren sind Urformverfahren
- AM kann Vorteile hinsichtlich Geometrie- und Gestaltungsfreiheit, Ressourceneinsparung und Nachhaltigkeit, sowie Digitalisierung und Automatisierung bieten
- AM ist ein Zukunftsmarkt und etabliert sich zunehmend als Fertigungsverfahren
- Limitierungen finden sich aufgrund erhöhter Kosten, sodass meist nur geringe Losgrößen wirtschaftlich sind
- Prozesse sind komplex und nicht für viele Legierungen stabil
- Daher ist der Einsatz auf Nischenanwendungen begrenzt
- AM-Prozesse sind komplex und hängen von einer Vielzahl von Einflussfaktoren ab (insb. LASER-Leistung, Scan-Geschwindigkeit und Lagenbreite bzw. Höhe)
- Es gibt verschiedene AM-Verfahren, die sich hinsichtlich der Vormaterialien und Energieeinbringung unterscheiden
- PBF-Verfahren (insb. PBF-LB) sind die häufigsten AM-Verfahren für Metalle, gefolgt von DED und MEX

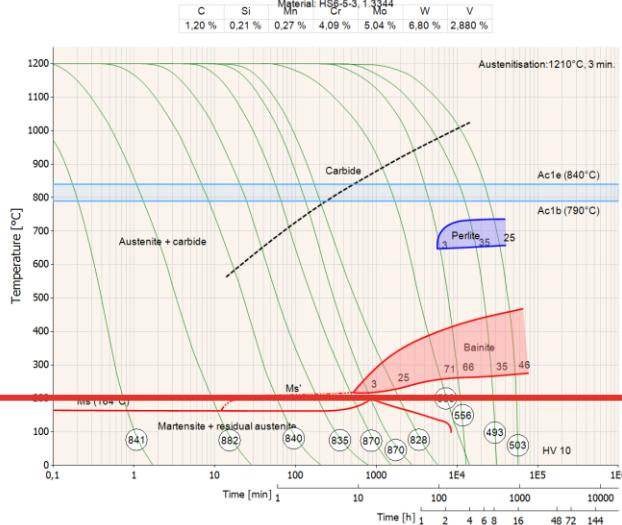
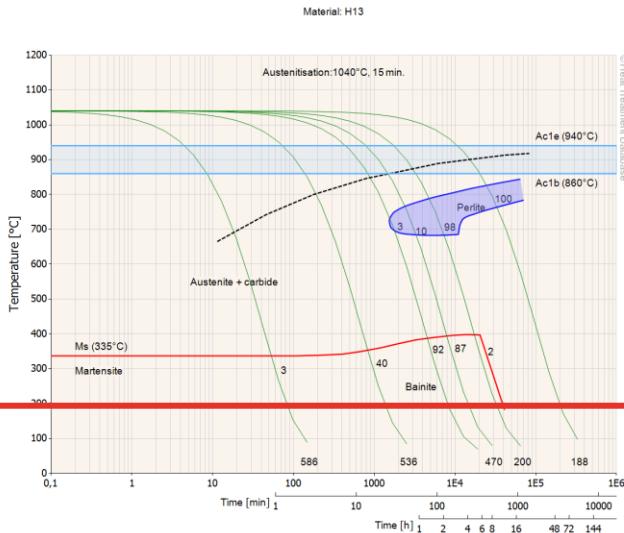
ZUSAMMENFASSUNG

- Stabile Prozessfenster können eng sein, sodass Fehlstellen wie Poren, Risse und Anbindungsfehler auftreten können
- An Metallpulver für AM werden besondere Anforderungen hinsichtlich der Fließfähigkeit gestellt
- Metallpulver werden mittels VIGA hergestellt und anschließend mit verschiedenen Verfahren fraktioniert und charakterisiert
- Schweißbarkeit ist eine Voraussetzung für die AM-Verarbeitbarkeit von Legierungen
- Austenitische Stähle lassen sich aufgrund der hohen Duktilität gut mittels AM verarbeiten
- Insbesondere Werkzeugstähle lassen sich bisher nur in Ausnahmen additiv verarbeiten
- Mikrostrukturen und Eigenschaften von mittels AM hergestellten Bauteilen unterscheiden sich von konventionellen Verfahren und weisen eine ausgeprägte Anisotropie auf
- Fein zellulare Mikrostrukturen, hohe Fehlstellen und Versetzungsdichte, ausgeprägte Mikroseigerungen
- Post-Processing mittels HIP kann Fehlstellen wie Poren schließen
- Durch Wärmebehandlungen lassen sich die Mikrostrukturen denen konventioneller Zustände annähern

ÜBUNGSFRAGEN

- Nennen Sie die wesentlichen Unterschiede zwischen Rapid-Prototyping, -Tooling und -Manufacturing
- Was ist die Ursache für das sog. „Balling“ im Falle des PBF-LB/M? Welche Prozessvariablen können Sie verwenden, um den Effekt zu minimieren?
- Was versteht man unter „Satellitenbildung“ und wie beeinflusst dies den Fertigungsprozess beim PBF-LB/M?
- Warum können additive Fertigungsverfahren die subtraktiven/konventionellen Verfahren derzeit nicht ersetzen?
- Nennen Sie die Einschränkungen der Designfreiheit bei der additiven Fertigung.
- Mit welchen additiven Fertigungsverfahren können vollständig geschlossene Hohlräume hergestellt werden?
- Werden die Stützstrukturen beim MEX-TRB vor oder nach dem Sintern entfernt?
- Können AM-Pulver im PBF-Verfahren wiederverwendet werden?

ÜBUNGSFRAGEN



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit
und Ihre Mitarbeit !

Dr.-Ing. Jonathan Lentz
Fakultät für Maschinenbau
Lehrstuhl Werkstofftechnik
44801 Bochum
Mail: Lenzt@wtech.rub.de