

RUB

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.“

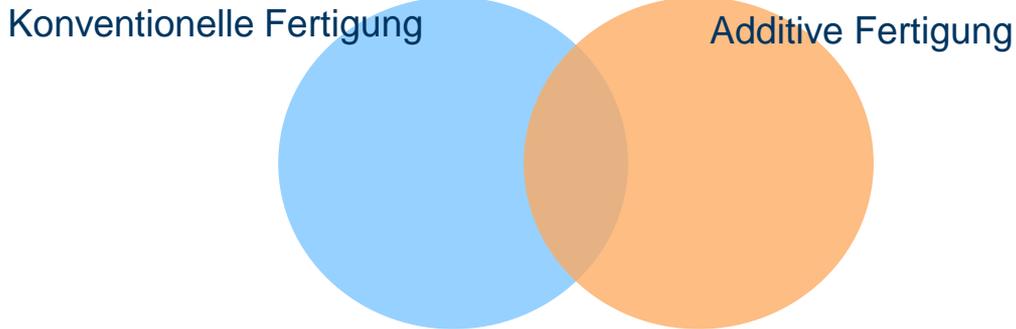
## Konventionelle Fertigung: Kombination vieler Fertigungsverfahren



## Additive Fertigung



# EINORDNUNG - Definition



## Hybride Fertigung

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



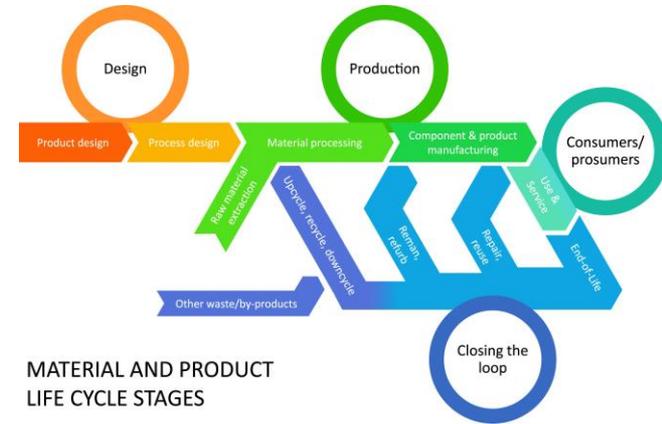
<https://www.autodesk.com/de/design-make/articles/lasim-vereint-additive-und-subtraktive-herstellungsverfahren>

# MOTIVATION - Nachhaltigkeit



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

- DfAM → Design for AM

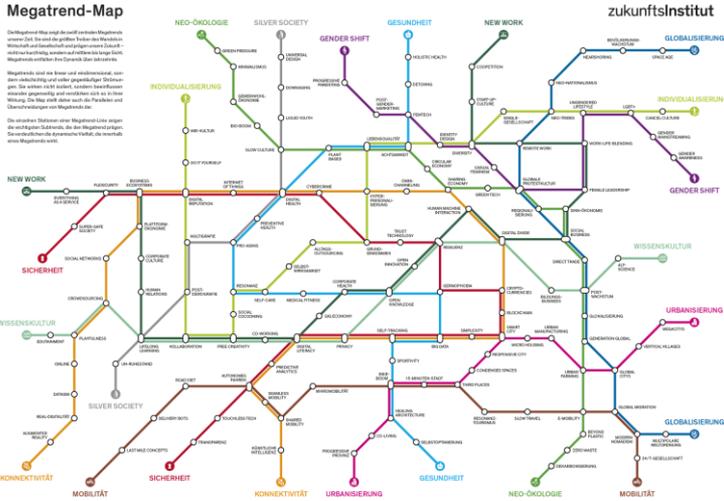


Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges, Journal of Cleaner Production, 2016,

# MOTIVATION – Megatrend Digitalisierung

## Megatrend-Map

Die Megatrend-Map zeigt die fünf größten Megatrends, die bis zum Jahr 2100 die Welt prägen werden. Sie sind: Neo-Ökologie, Silver Society, Gender Shift, Gesundheit und New Work. Diese Trends werden durch die Digitalisierung verstärkt und verändern die Welt grundlegend. Die Megatrend-Map zeigt die Zusammenhänge zwischen den Trends und die Auswirkungen auf die Gesellschaft. Die Megatrend-Map ist ein Werkzeug, um die Zukunft zu verstehen und zu gestalten.



<https://www.zukunftsinstitut.de/artikel/die-megatrend-map/>

## Megatrends

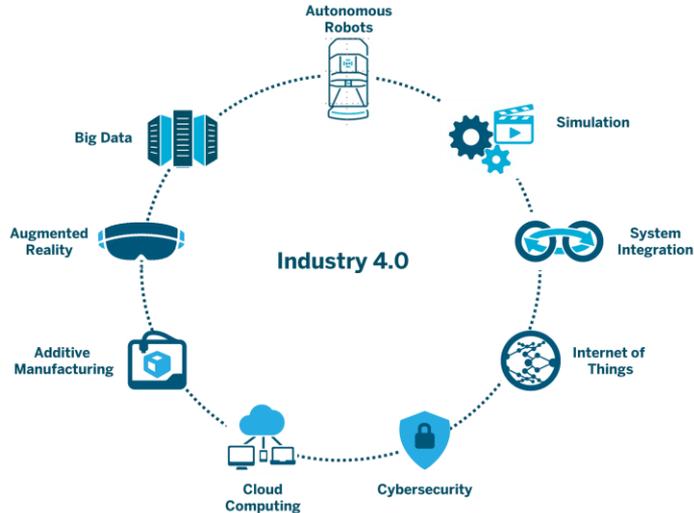
- Neo-Ökologie
- Powershift
- Neo-Urbanisierung
- Global Uprising
- Demografischer Wandel
- Silver Society
- mHealth
- Gesundheit
- New Work
- Individualisierung
- Wertewandel
- Familie 2.0
- Nachhaltigkeit**
- Konsumverhalten**
- Digitalisierung**
- Digitale Bildung

## Digitalisierung Subtrends

- Industrie 4.0**
- Automatisierung/Robotik
- Konnektivität
- 3D-Druck/additive Fertigung**
- Big Data Management
- Augmented Reality
- Open Innovation
- Humanoide Roboter
- Digitale Zahlungssysteme
- eFinance
- SmartHome
- eMobilität
- Autonomes Fahren
- Biotechnologie
- Nano-/Mikrotechnologien

T. Kaufmann, Strategiewerkzeuge aus der Praxis, ISBN: 978-3-662-63105-8

# MOTIVATION – Industry 4.0 & Additive Manufacturing

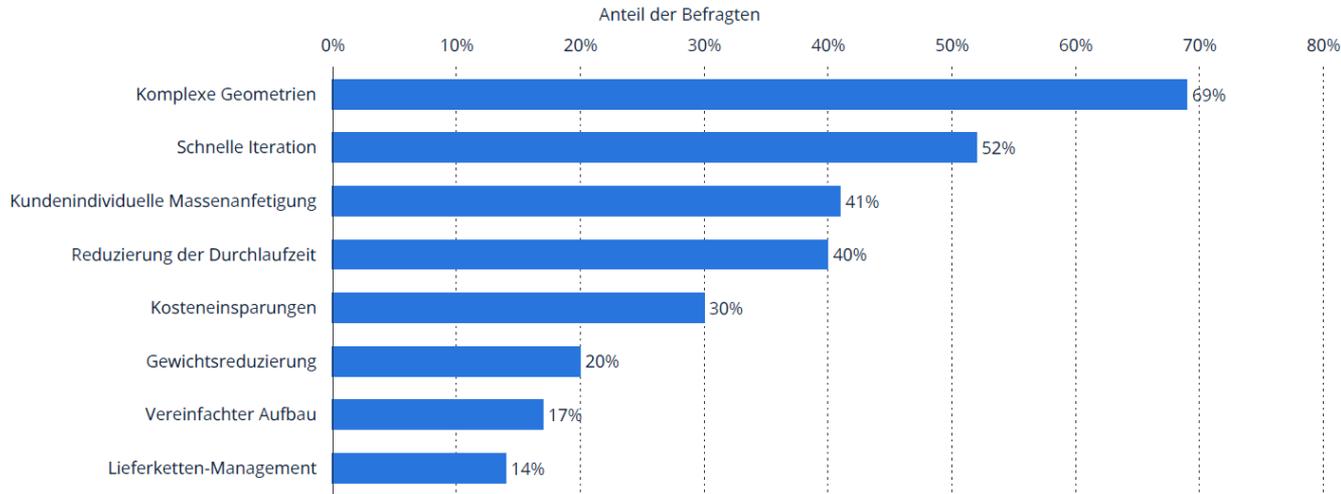


<https://aethon.com/mobile-robots-and-industry4-0/>

Die Fabrik der Zukunft:  
„Verknüpfung digitaler Datenströme mit physikalischen  
Produkten“ → 3D-Druck

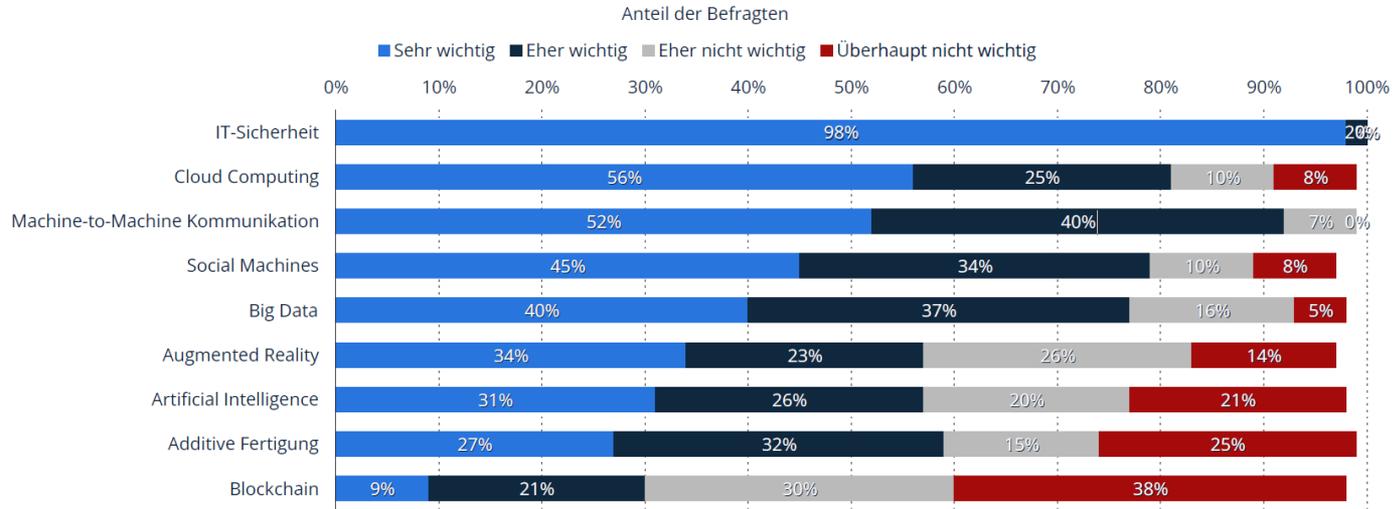
# MOTIVATION – Vorteile

Was sind die Hauptvorteile des 3D-Drucks?



Statista, Additive Fertigung Report, 2023

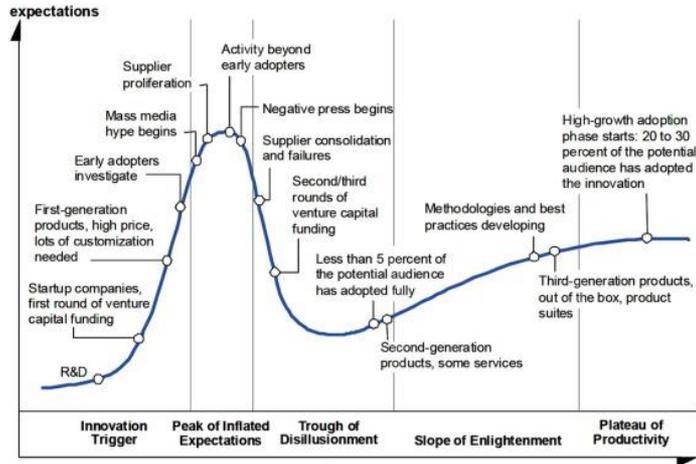
# EINORDNUNG – Hype um Additive Fertigung?



Statista, Additive Fertigung Report, 2023

# EINORDNUNG – Hype um Additive Fertigung?

## Gartner's Hype Cycle



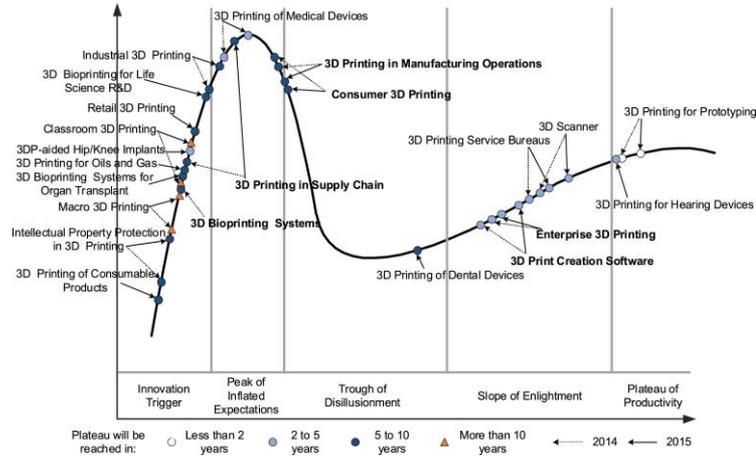
R. Kreutzer, Digitale Revolution, 2015, Der Gartner Hype Cycle als prognostischer Hintergrund

- 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“)

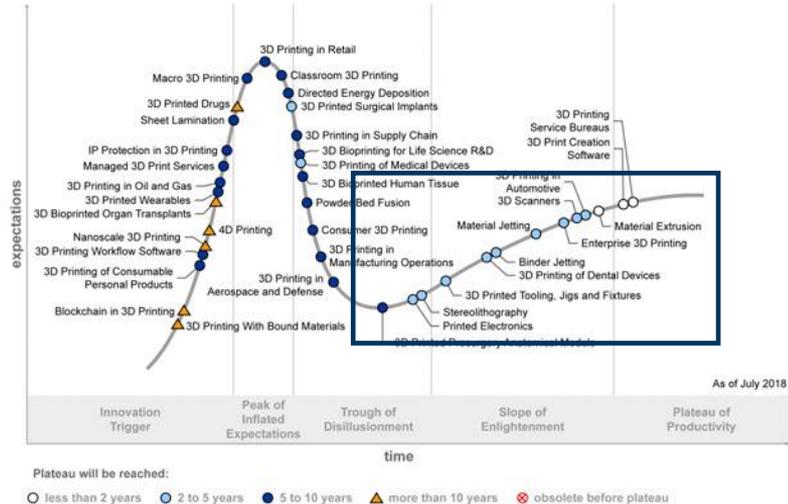
***„Wir neigen dazu, die kurzfristige Wirkung einer Technologie zu überschätzen und die langfristige Wirkung zu unterschätzen.“***

# EINORDNUNG – Hype um Additive Fertigung?

2014 & 2015



2018

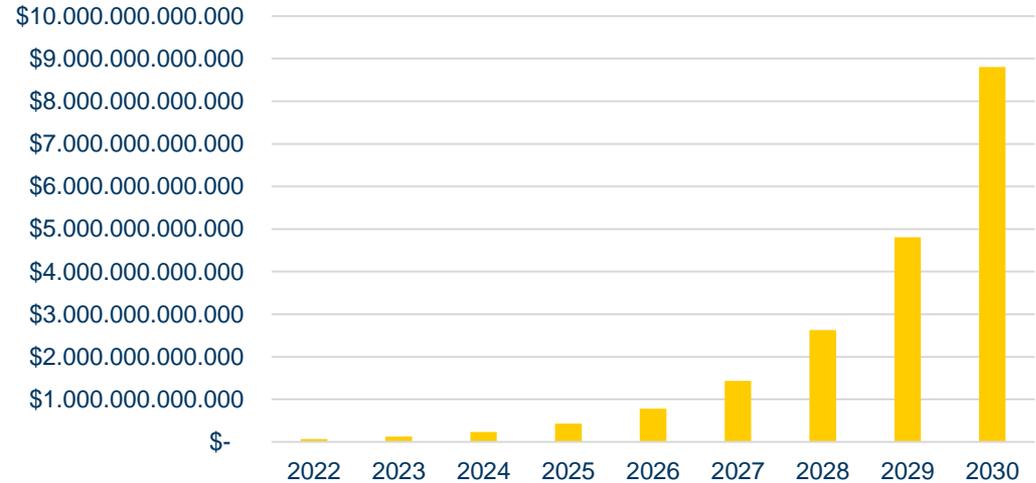


<https://www.3dnatives.com/de/gartner-bericht-2019/#!>

# 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.”

Wachstumsmarkt AM



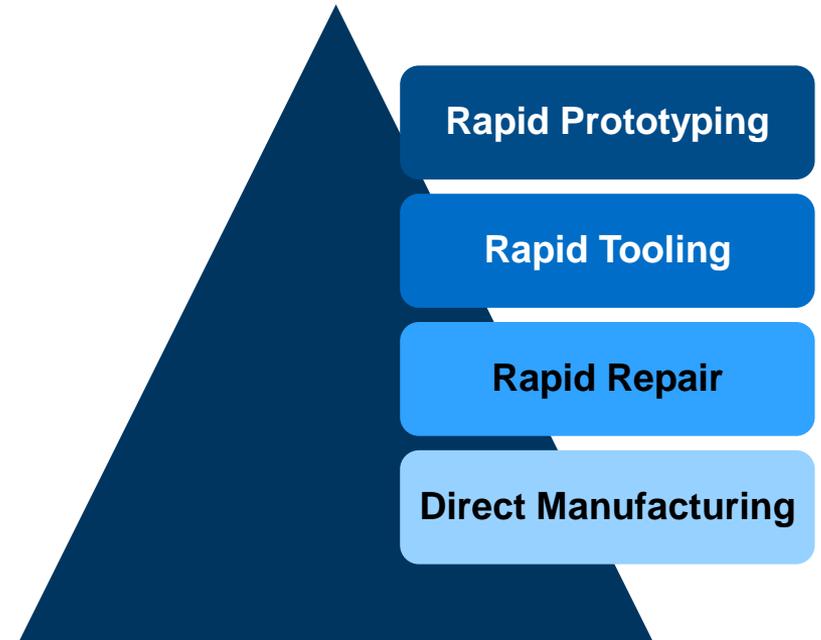
BIG IDEAS 2023, White Paper, ARK Investment Management LLC.

# 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

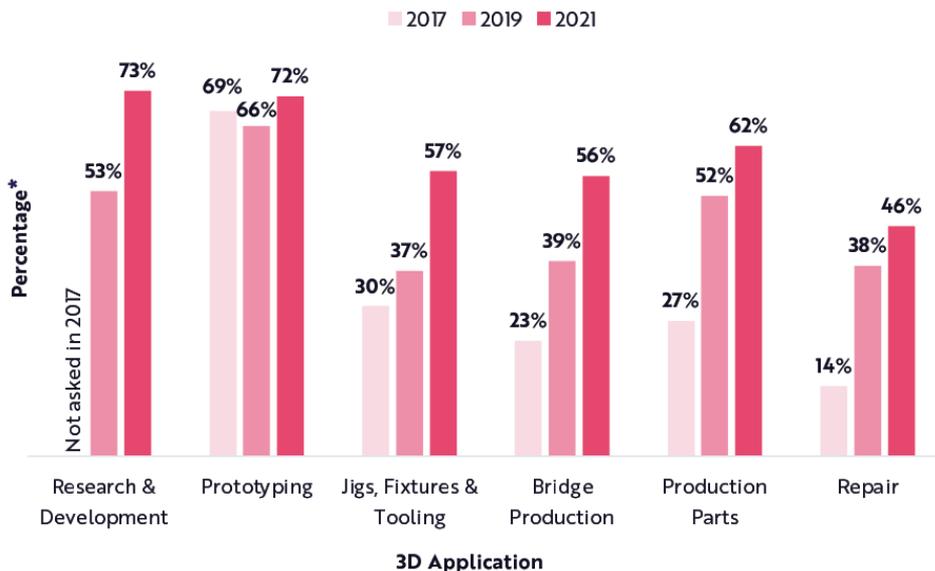
ARK Investment Management LLC (2020) Big Ideas 2020 – by ARC Invest [online]. <https://ark-invest.com/>.



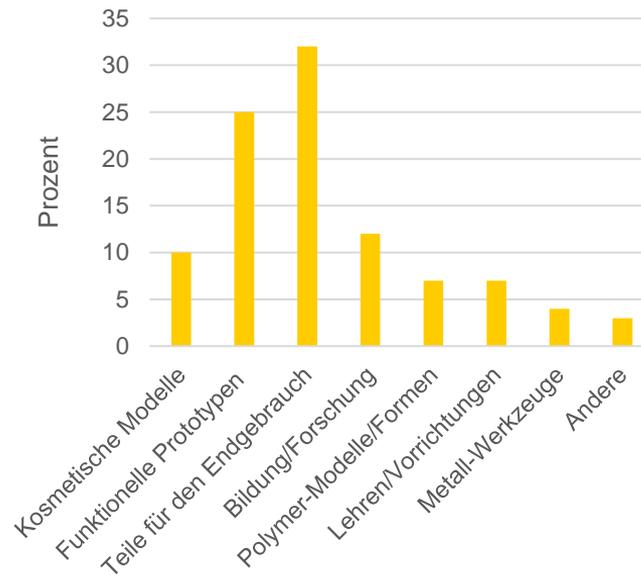
Einsatzbereiche nach VDI 3405

# EINORDNUNG – Anwendungen

Use Of 3D Printing Across Applications And Time  
 "In What Way Does Your Company Currently Use 3D Printing?"



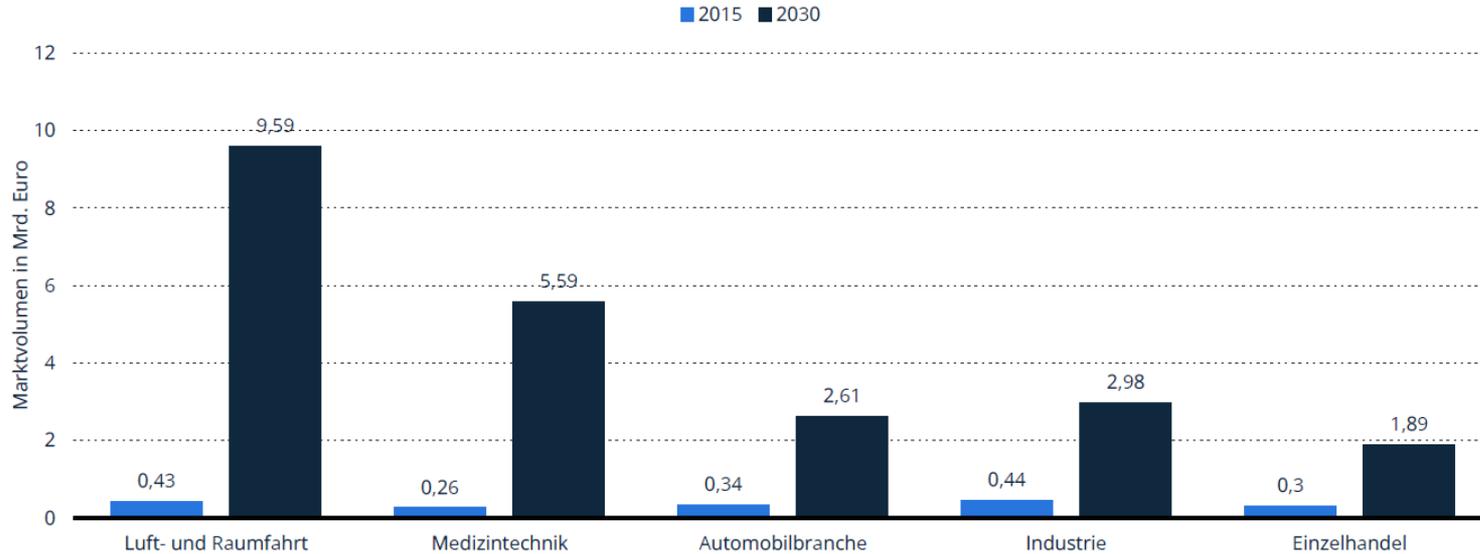
BIG IDEAS 2023, White Paper, ARK Investment Management LLC.



Wohlers Report 2021

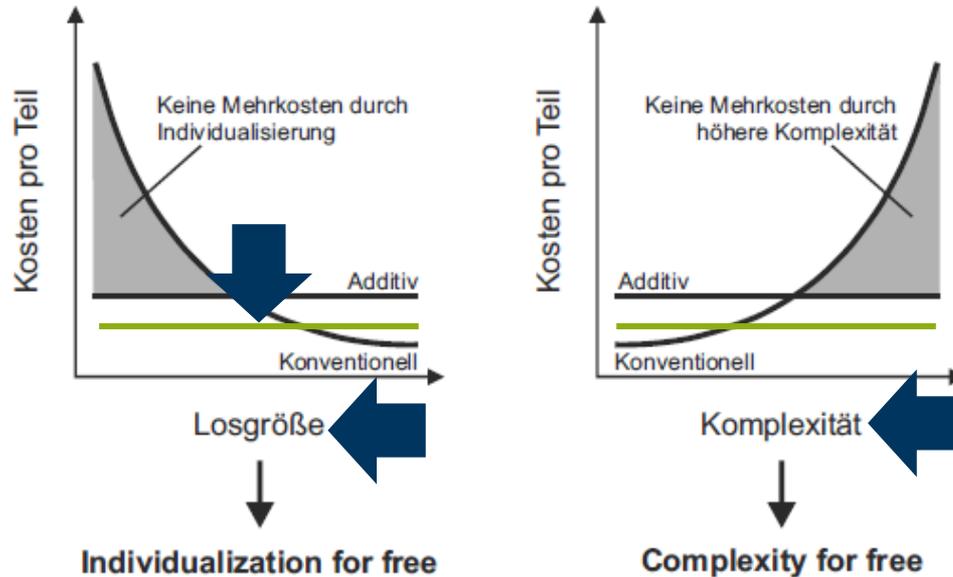
# EINORDNUNG – Branchen

## Marktsegmente



Statista, Additive Fertigung Report, 2023

# MOTIVATION – Kostenfaktor?



## Kosten sinken

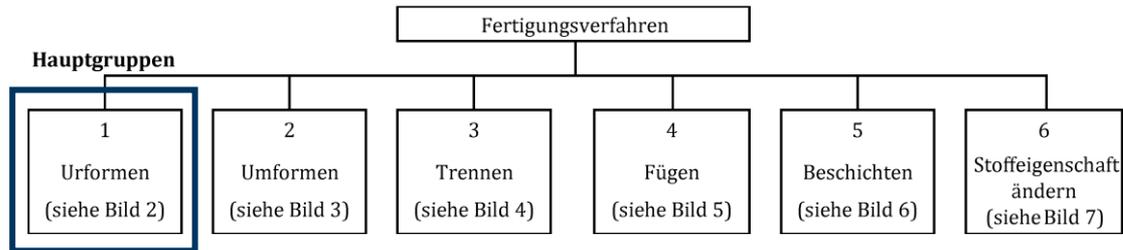
- Geringe Losgrößen und Bauteile geringerer Komplexität werden wirtschaftlich

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

# EINORDNUNG - Fertigungsverfahren

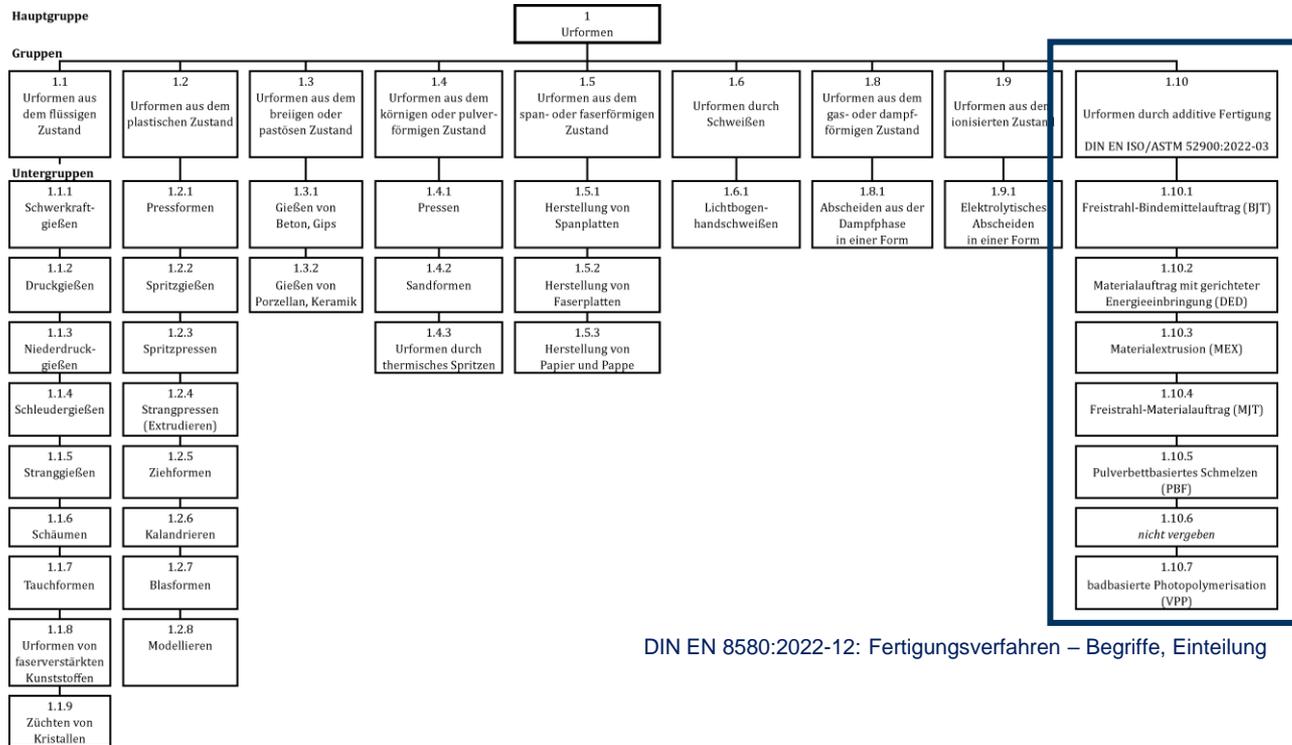
DIN EN 8580:2022: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung

„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



**Neu seit 2022!**

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

# 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

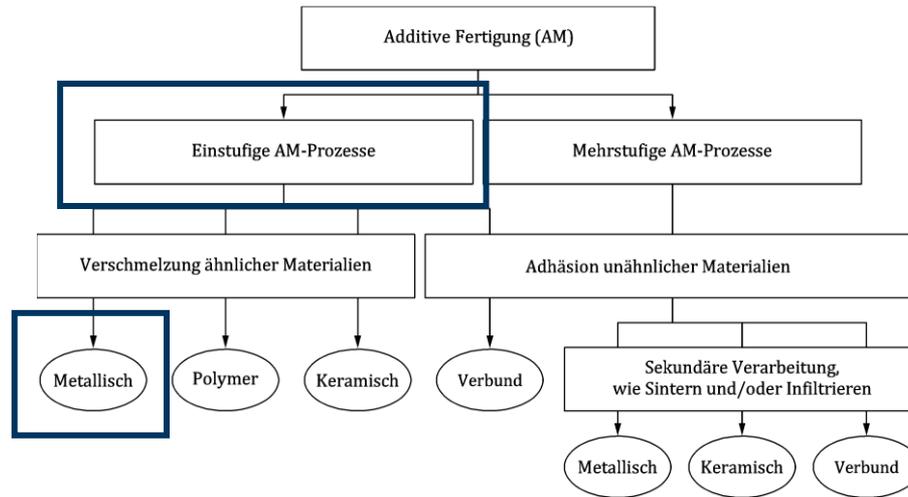
## VDI Richtlinien 3405:

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

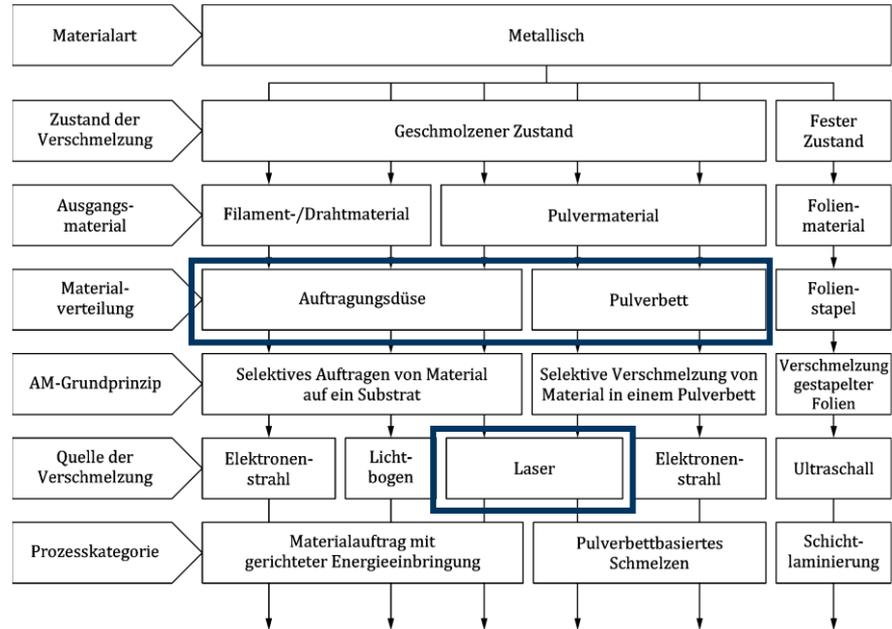
VDI 3405 Additive Fertigungsverfahren: Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen

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)	/M (Metal) /P (Polymer) /C (Ceramic) /Cp (Composite)	Durch fokussierte Elektronen- oder Laserstrahlen wird ein Pulverbett selektiv aufgeschmolzen
Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung:	DED (Directed energy deposition)	-LB (Laser Beam) -Arc (Lichtbogen)		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**

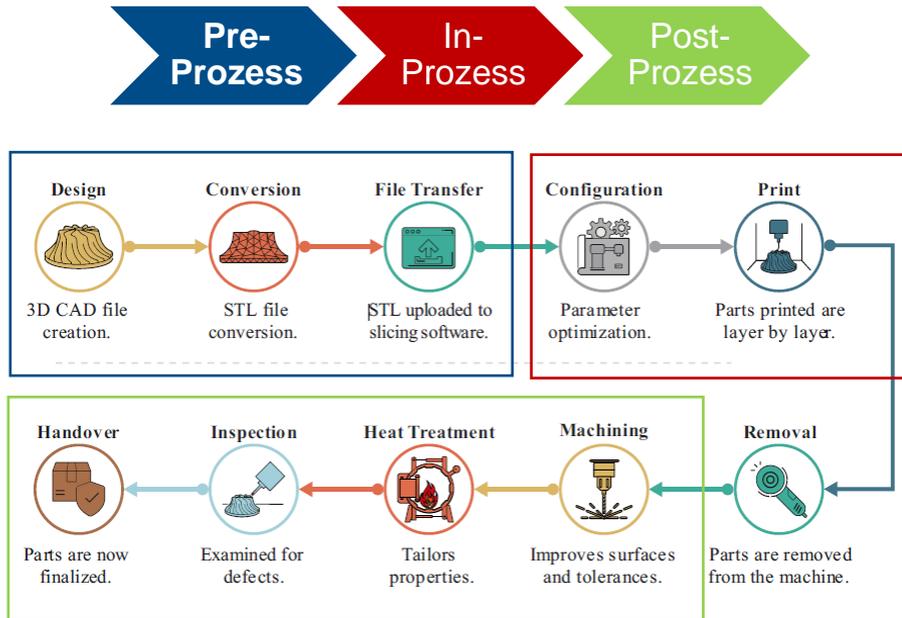
# EINORDNUNG – Alternativen Terminologie

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

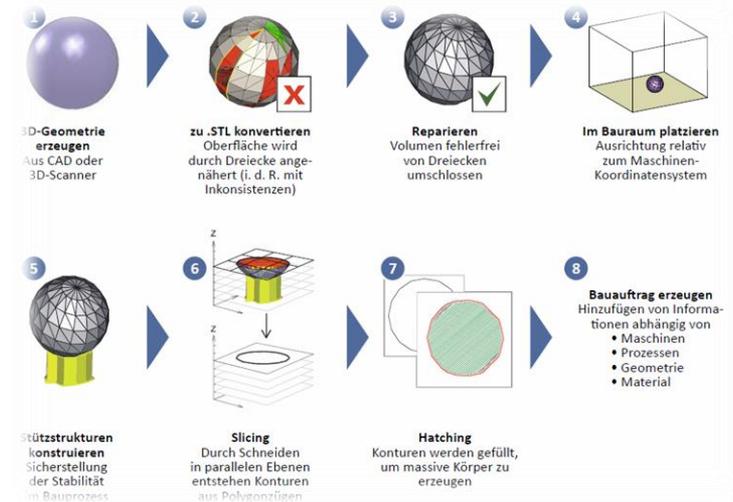
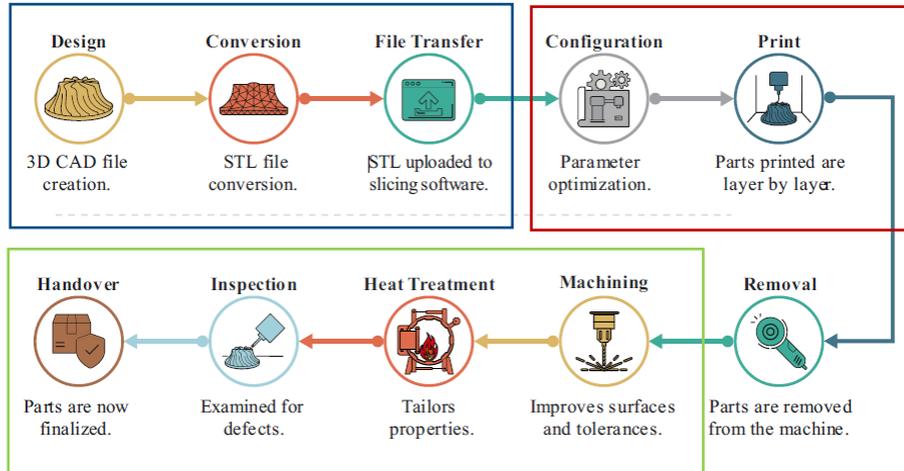
### ▪ Post-Prozess

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

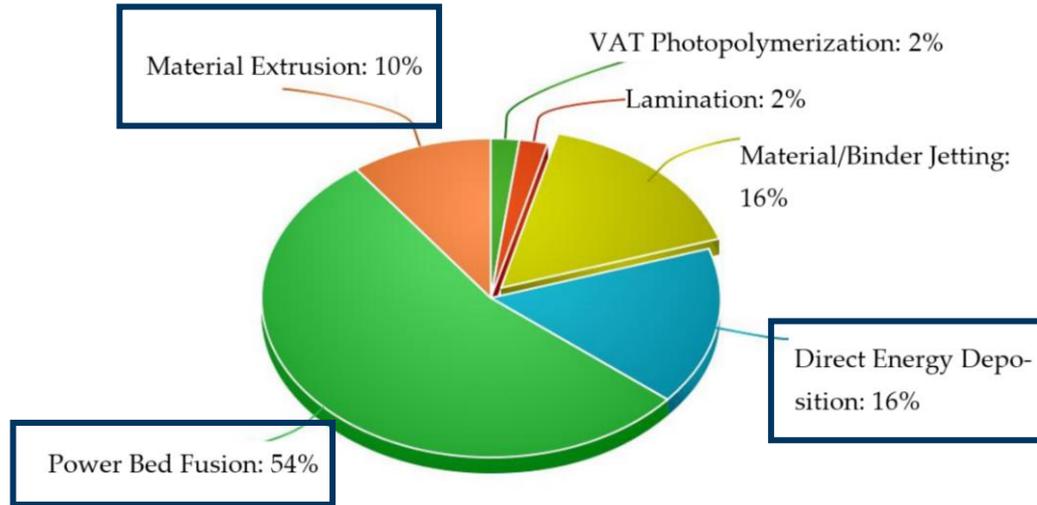
Armstrong, Mark; Mehrabi, Hamid; Naveed, Nida (2022): An overview of modern metal additive manufacturing technology. In: *Journal of Manufacturing Processes* 84, S. 1001–1029. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.10.060.

# VERFAHREN - Prozessschritte

Prozessschritte nach VDI 3405



# VERFAHREN – Relevanz der Verfahren

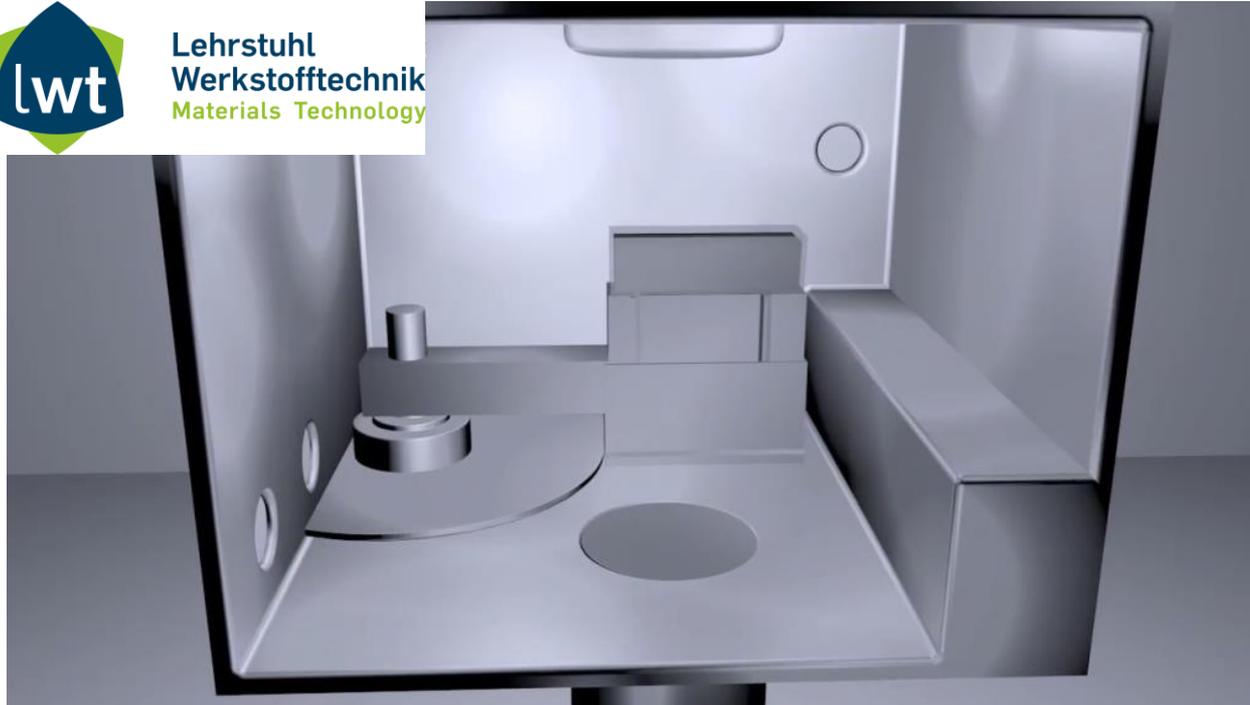


Vafadar, Ana; Guzzomi, Ferdinando; Rassau, Alexander; Hayward, Kevin (2021): Advances in Metal Additive Manufacturing: A Review of Common Processes, Industrial Applications, and Current Challenges. In: *Applied Sciences* 11 (3), S. 1213. DOI: 10.3390/app11031213

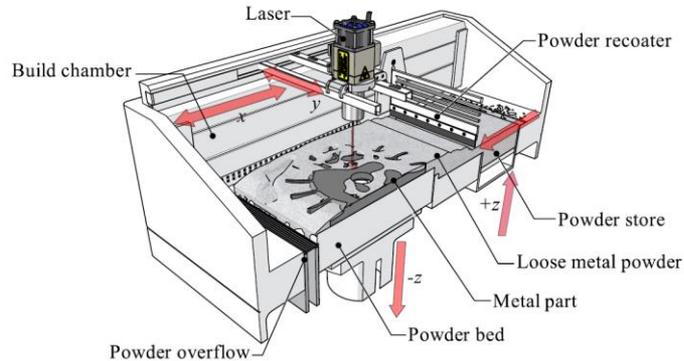
# VERFAHREN – PBF-LB/M



Lehrstuhl  
Werkstofftechnik  
Materials Technology



# VERFAHREN – PBF-LB/M



**Synonyme:** SLM

**Kategorie:** Powder Bed Fusion

**Werkstoffe:** schweißgeeignete Metalle und Metalllegierungen in Pulverform

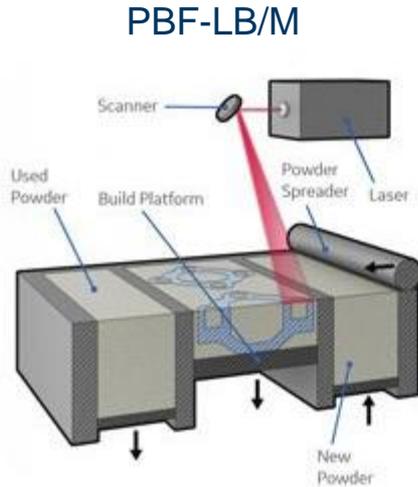
**Bauteilqualität/Genauigkeit/Oberflächen:** raue Oberfläche

**Aufbaurrate:** bis 25 cm<sup>3</sup>/h; ca. 100 bis 200 g/h

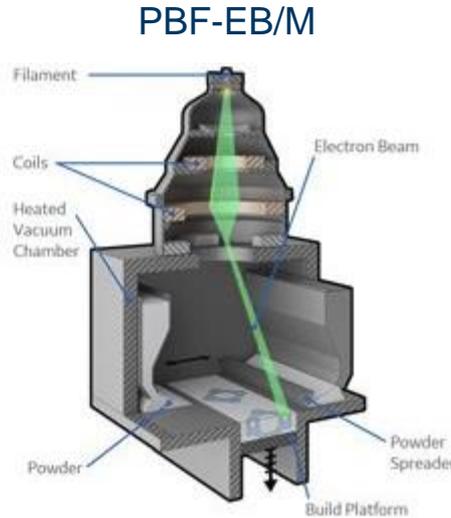
**Anwendungsbereich:** Rapid Tooling, Rapid Manufacturing

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

# VERFAHREN – PBF-LB/M vs. PBF-EB/M



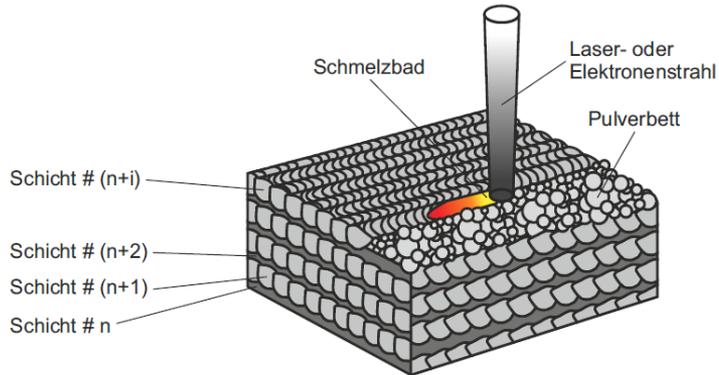
Schutzgas (Argon oder Stickstoff)



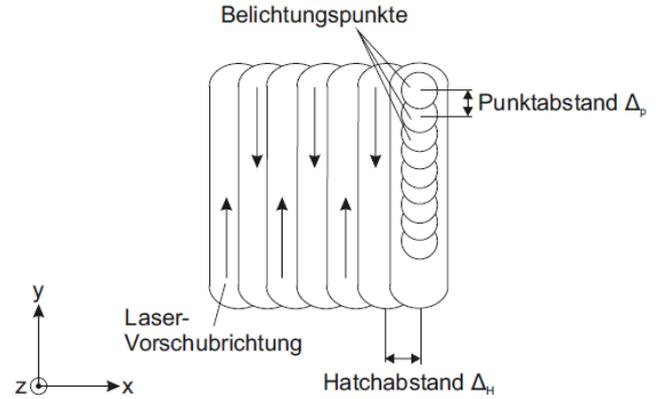
Vakuum

- Interaktion von Werkstoff und Prozessatmosphäre
- Abdampfen von Metallen im Vakuum
- Reaktion/Aufnahme von N im Schutzgas
- Bildung von Ar- oder N<sub>2</sub>-Poren möglich

# VERFAHREN – PBF-LB/M

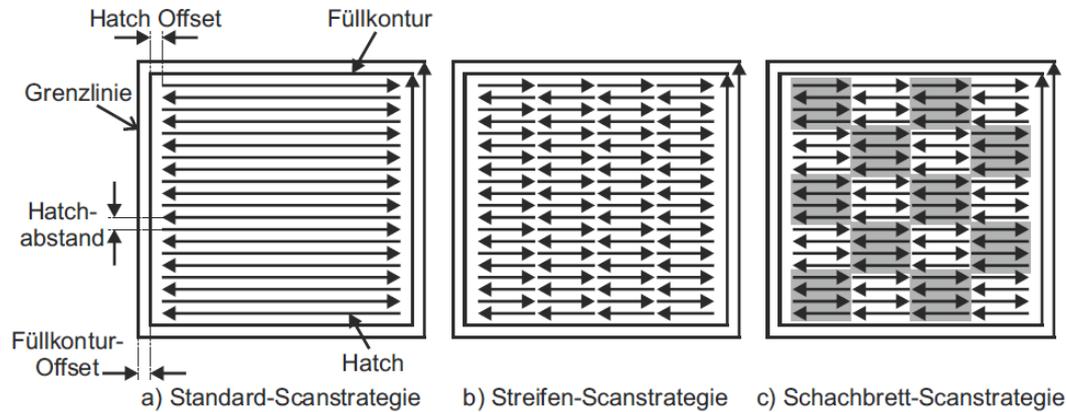


Dissertation Geenen, 2018



# VERFAHREN – PBF-LB/M

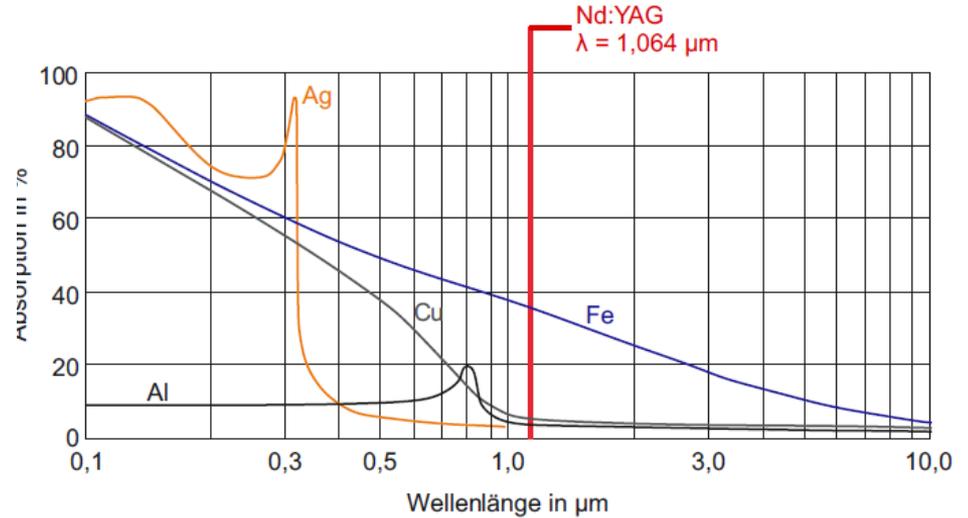
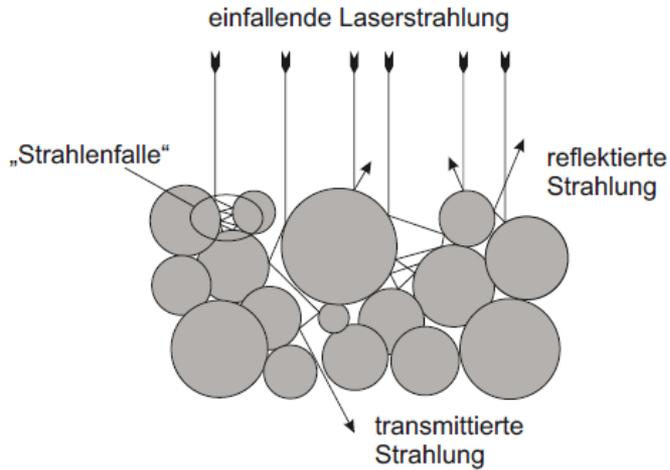
Belichtungsstrategie (auch Scan- oder Rasterstrategie genannt)



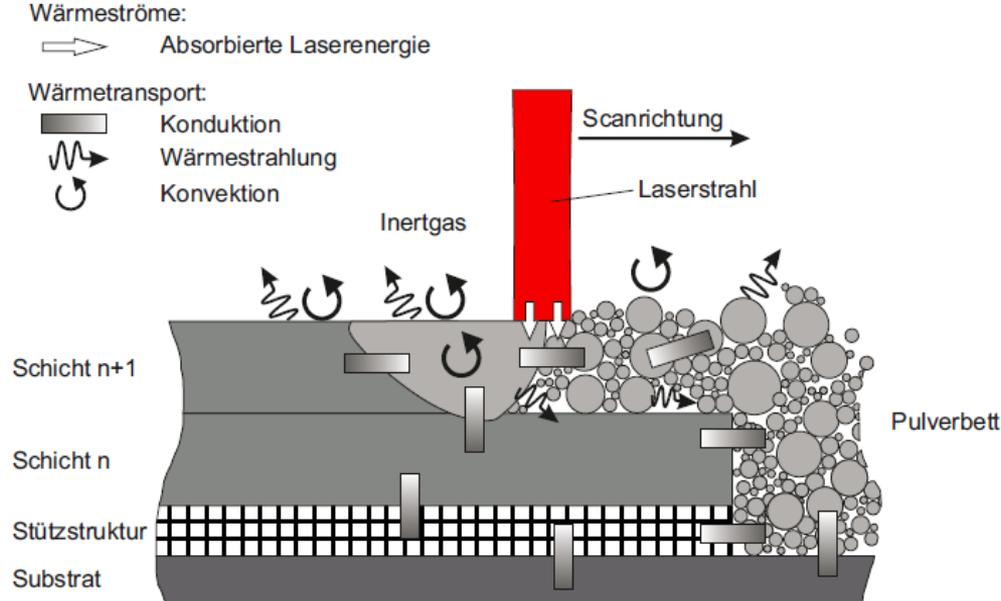
- Viele weitere Strategien möglich
- Meist Rotation der jeweiligen Strategie nach jeder Schicht

Dissertation Geenen, 2018

# VERFAHREN –LASER-Pulver-Interaktion



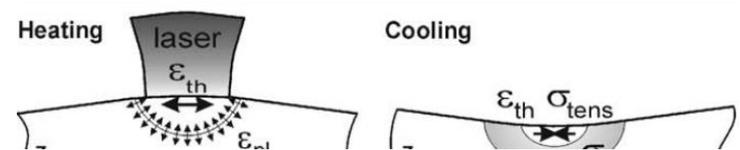
# VERFAHREN – PBF-LB/M Temperaturbedingung



- 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

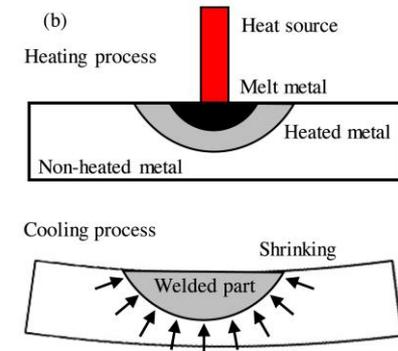
- Lokal hoher Temperaturgradient
- Volumenschwund durch Erstarrung und Abkühlung
- Temperaturverteilung abhängig von
  - Laserleistung
  - Zeitlicher Abstand zwischen benachbarten Scans
  - Wärmeleitung
  - Stützstrukturen
  - verdichtetes Material
  - Pulverbett



Hohe thermische Eigenspannungen → Verzug und oder Risse

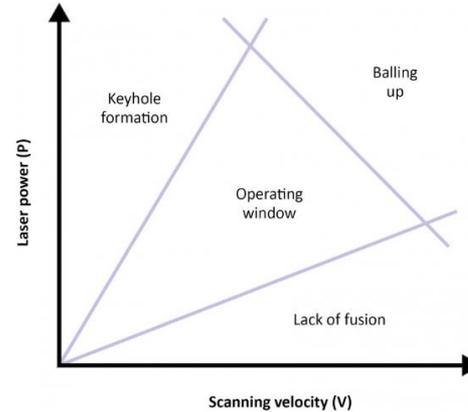
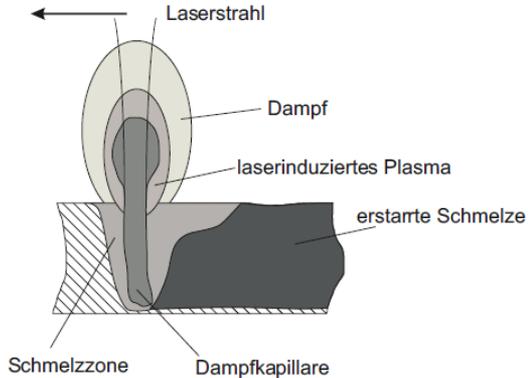
# VERFAHREN – PBF-LB/M

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

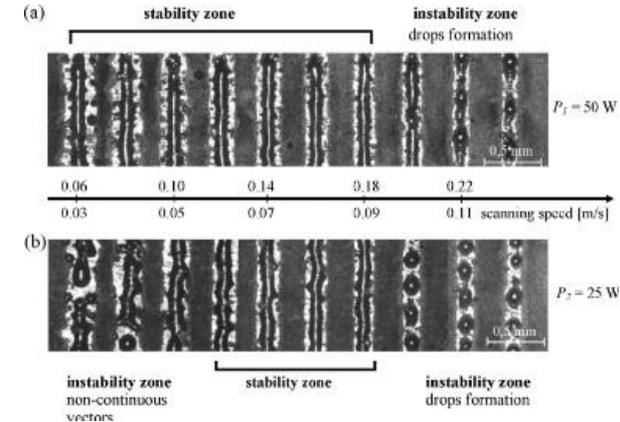


Verzug im Prozess → „Warping“ – Abbruch des Prozesses

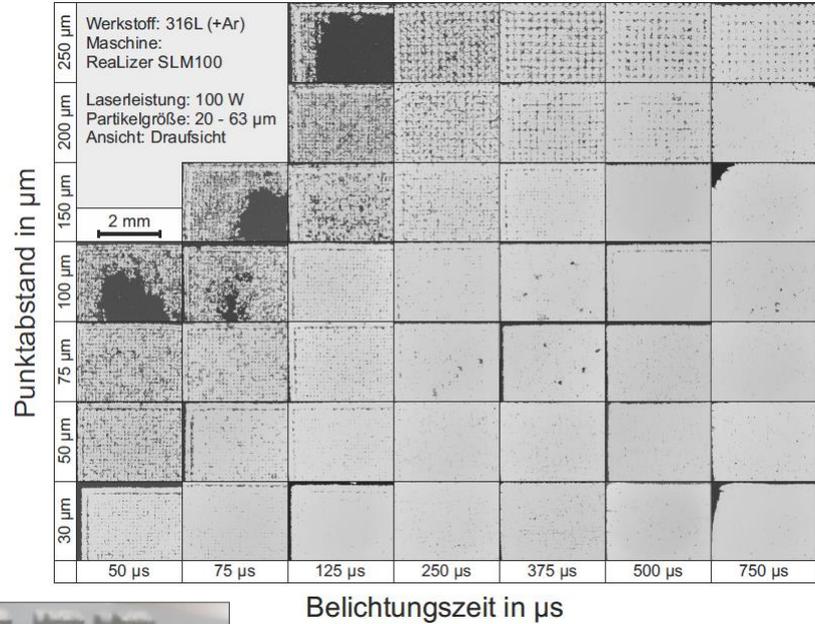
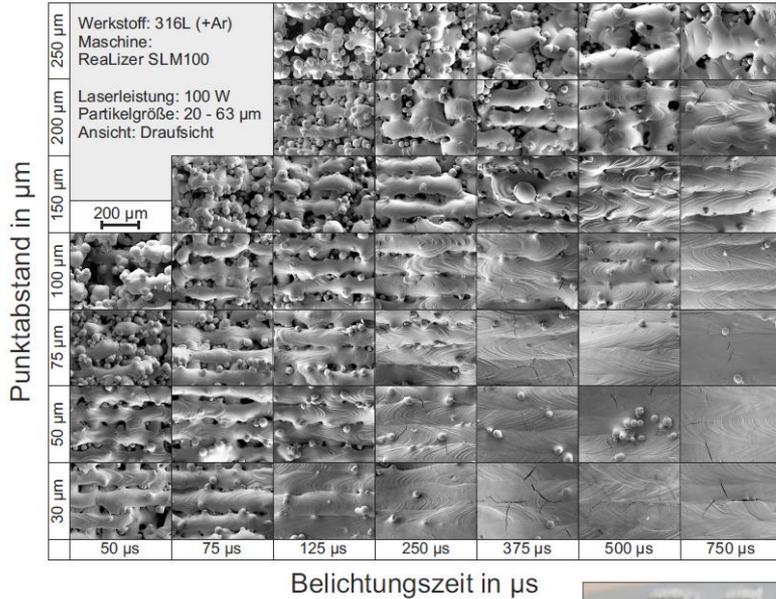
# VERFAHREN – LASER-Pulver-Interaktion



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



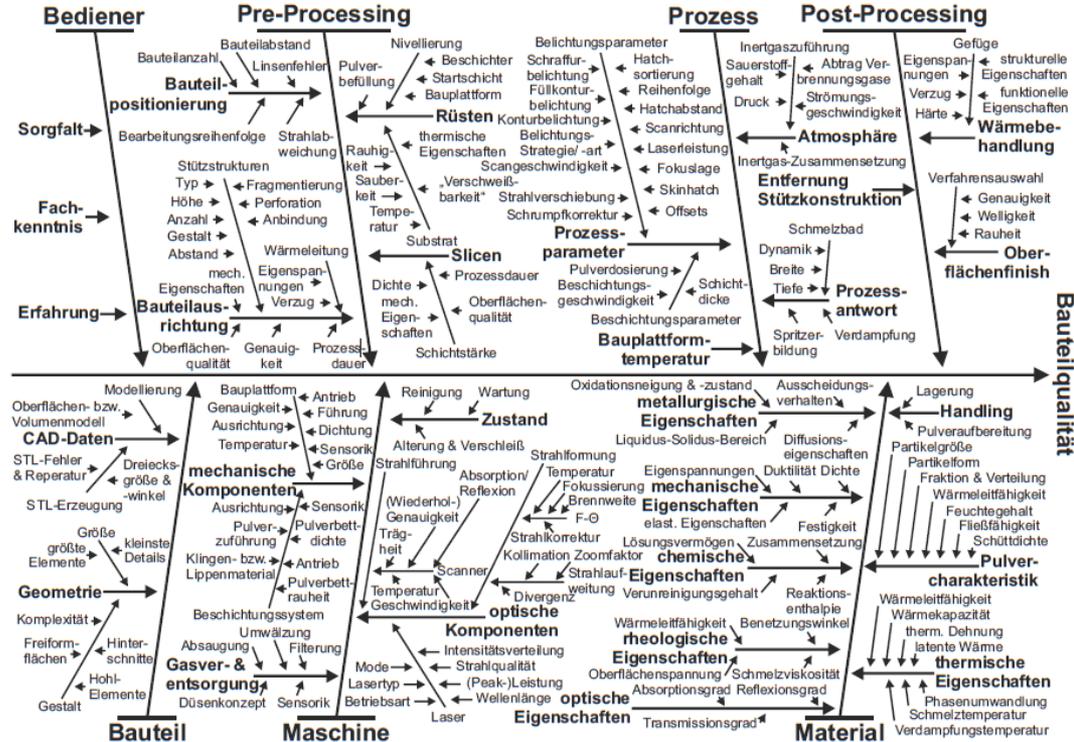
# VERFAHREN – PBF-LB/M Parameterstudien



Dissertation Geenen, 2018



# VERFAHREN – PBF-LB/M



# VERFAHREN – PBF-LB/M

## Anlagen-technische Unterschiede:

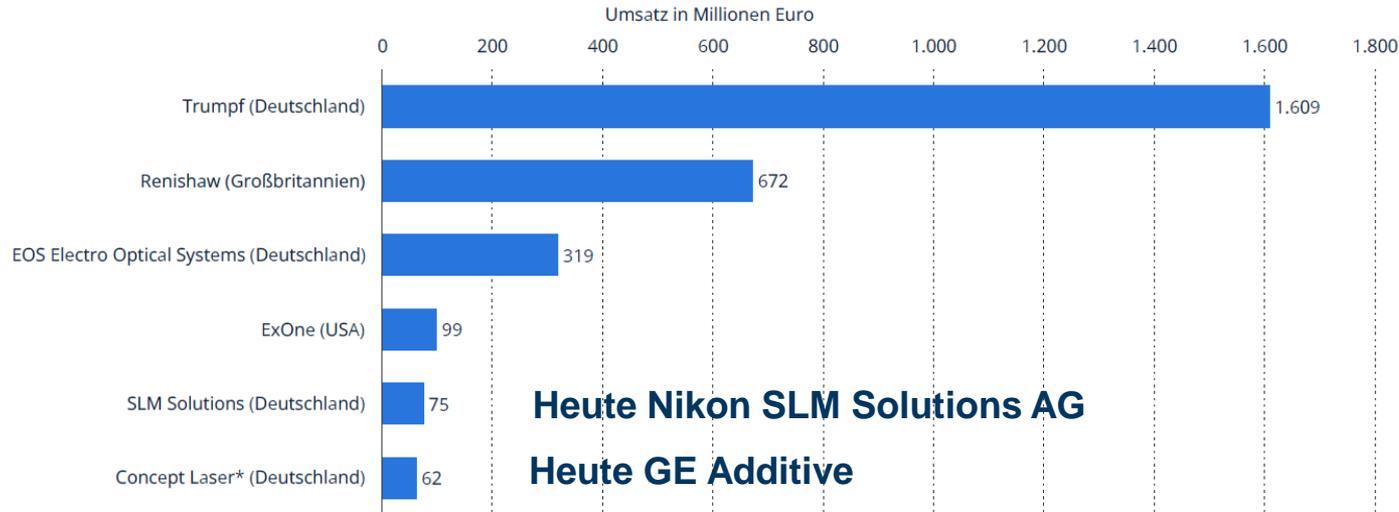
- LASER-Leistung (heute ca. 400 – 700 W)
- Multi-LASER-Systeme
- Vorheizen der Bauplattform (heute 200 °C)
- Auflösung des LASER
- Integrierter, geschlossener Pulverkreislauf
- Automatische Pulveraufbereitung
- Größe der Bauplattform
- Art der Pulverzuführung
- Art der Inertgasführung



[https://www.trumpf.com/de\\_DE/produkte/maschinen-systeme/additive-fertigungssysteme/truprint-3000/](https://www.trumpf.com/de_DE/produkte/maschinen-systeme/additive-fertigungssysteme/truprint-3000/)

# VERFAHREN – PBF-LB/M

## Additive Metallfertigung - Wichtige Systemhersteller weltweit nach Umsatz 2021



Statista, Additive Fertigung Report, 2023

# VERFAHREN – DED-LB/M

**Synonyme:** LMD, LENS, EBAM, LBMD

**Kategorie:** Directed Energy Deposition

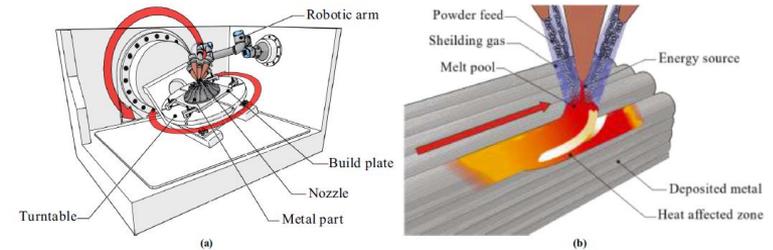
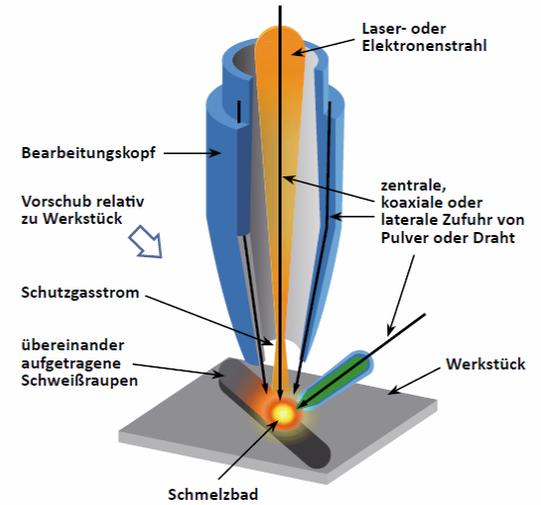
**Werkstoffe:** schweißgeeignete Metalle und Metalllegierungen, keramische Verstärkungspartikel

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

**Aufbaurrate:** hoch (100-1500 g/h)

**Anwendungsbereich:** Rapid Tooling, Rapid Manufacturing mit Nachbearbeitung

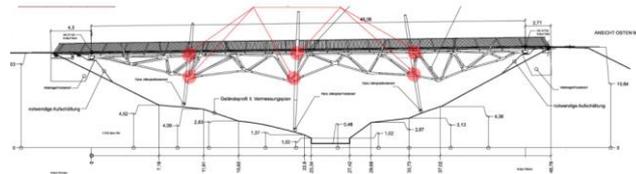
**Besonderheiten:** Aufbau von Freiformflächen möglich, schichtweise Materialvariationen umsetzbar



# VERFAHREN – DED-LB/M



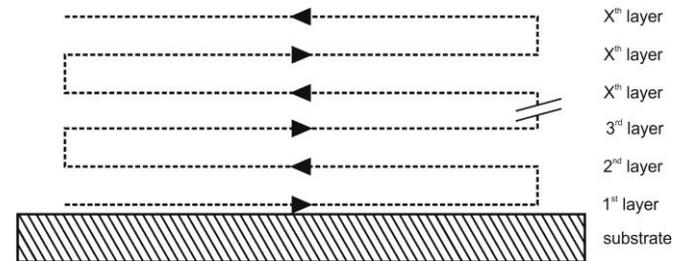
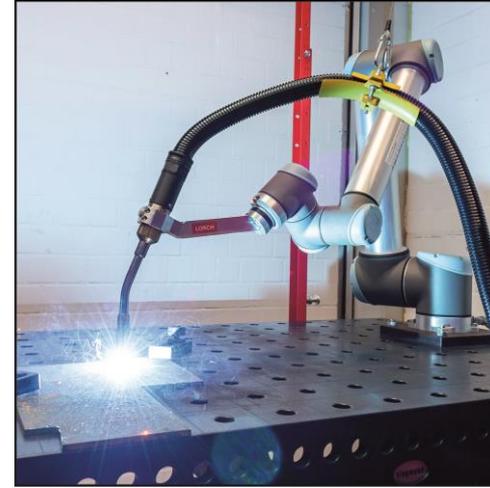
EXAFUSE aus Bochum



<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	
Auftragrate	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

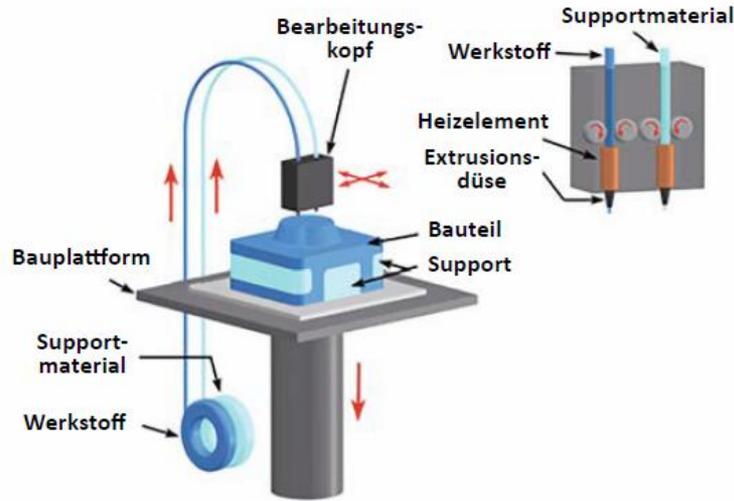


Abbildung 3-3: Strangablegeverfahren (FDM™) (Quelle: CustomPartNet LLC)

**Synonyme:** FDM, FFF, Schmelzschichtung

**Kategorie:** Material Extrusion

**Werkstoffe:** Filamente aus amorphen oder teilkristallinen Thermoplasten

**Bauteilqualität/Genauigkeit/Oberflächen:**

Schichten deutlich zu erkennen, fehleranfällig

**Aufbaurrate:** mittel - hoch

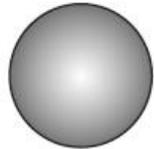
**Anwendungsbereich:** Rapid Prototyping,  
(Rapid Tooling)

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

# VERFAHREN – Vergleich Pulver vs. Draht

Anforderungen:

- Keine Satellitenbildung
- Keine Agglomerate
- Geringe Kontamination (O<sub>2</sub>, Feuchtigkeit)
- **Gute Fließfähigkeit**



Fehlerfrei



Partikel mit Spritzer



Satellitenbildung

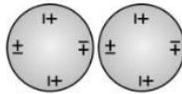
Einflussfaktoren und Charakterisierung:

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

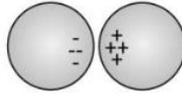
# VERFAHREN – Pulveranforderungen

## Partikel-Partikel-Interaktion und Haftung

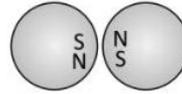
### Oberflächen- und Feldkräfte



van-der-Waals-Kräfte

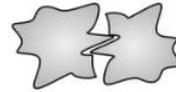


elektrostatische Kräfte

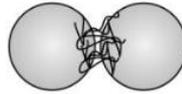


magnetische Kräfte

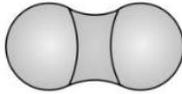
### Formschluss



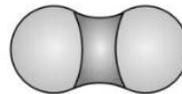
### Materialbrücken



organische Makromoleküle



Flüssigkeitsbrücken

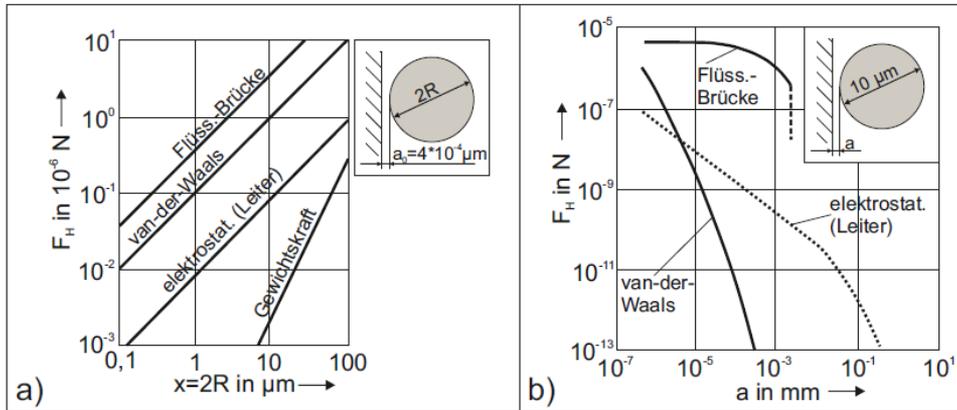


Versintern



chemische Reaktion

# VERFAHREN – Pulveranforderungen

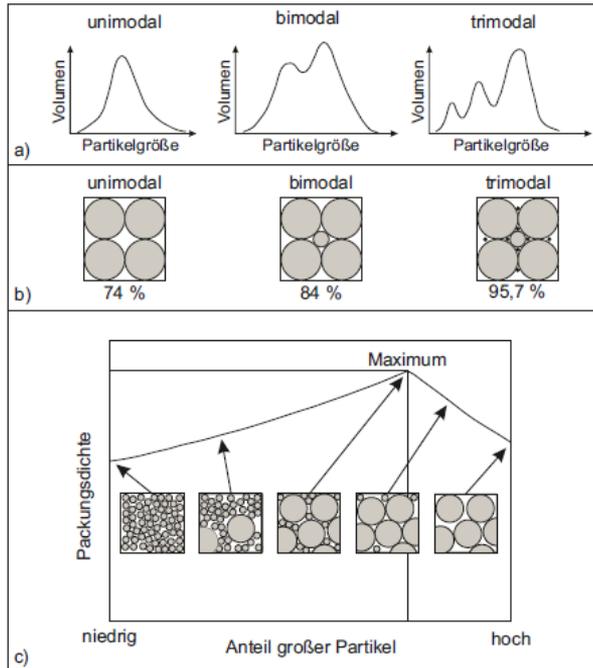


Dissertation Boes

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

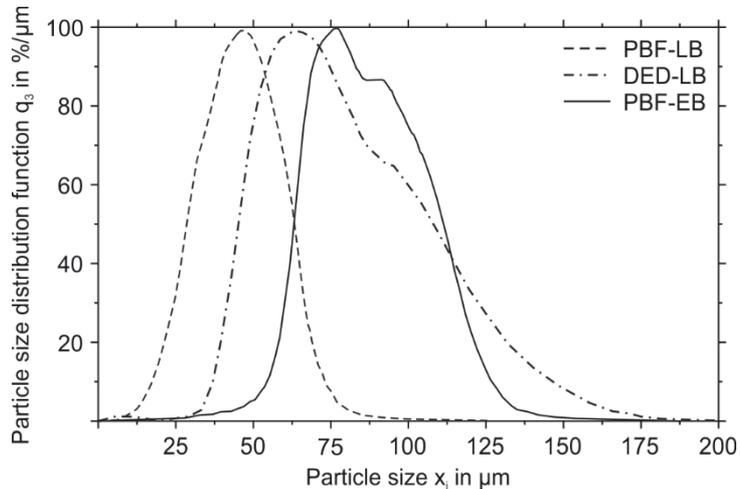
- Gewichtskraft nimmt stärker mit  $a$  zu als Haftkraft  
→ Fließfähigkeit verbessert sich mit Partikelgröße
- Haftkraft sinkt mit Abstand
  - Rauigkeit?
    - Feiner Rauigkeit → Erhöht Fließfähigkeit
    - Grobe Rauigkeit → „Verhaken“ & Adhäsion

# VERFAHREN – Pulveranforderungen



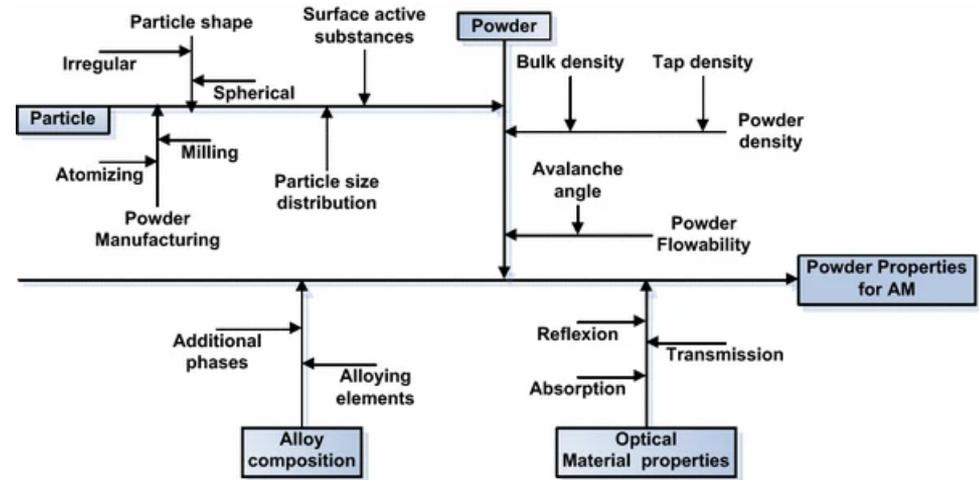
- Additivieren von Pulvern mit Nanopartikeln  
→ Erhöhen der Fließfähigkeit

# VERFAHREN – Pulveranforderungen



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

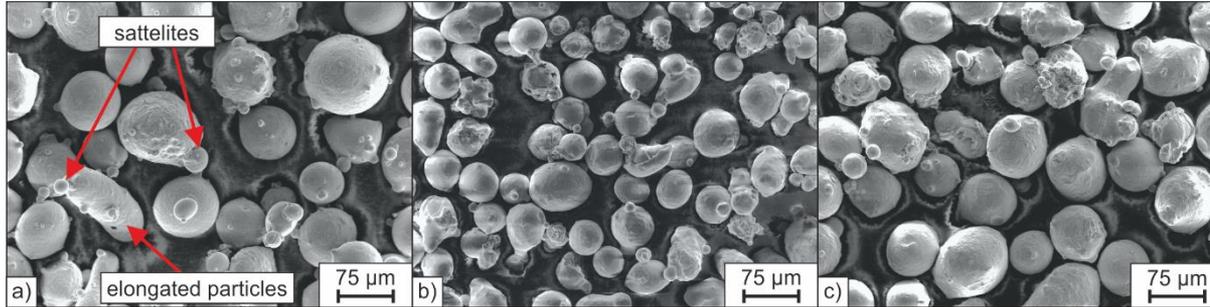
- **Verschiedene Partikelgröße in verschiedenen Verfahren**



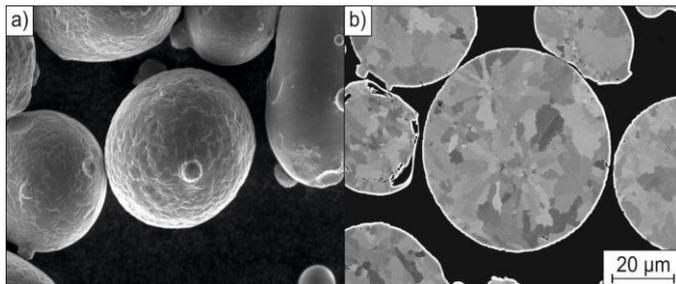
## Ishikawa diagram with influencing parameters for metal powders

Spierings, A. B.; Voegtlin, 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



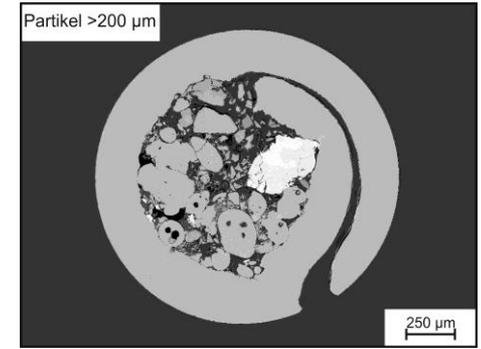
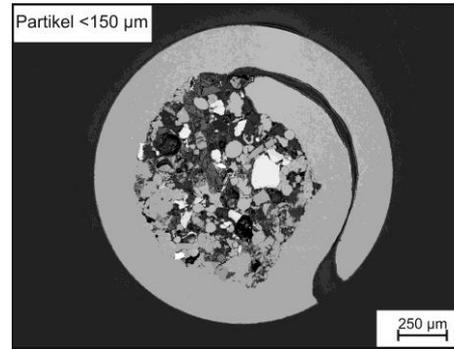
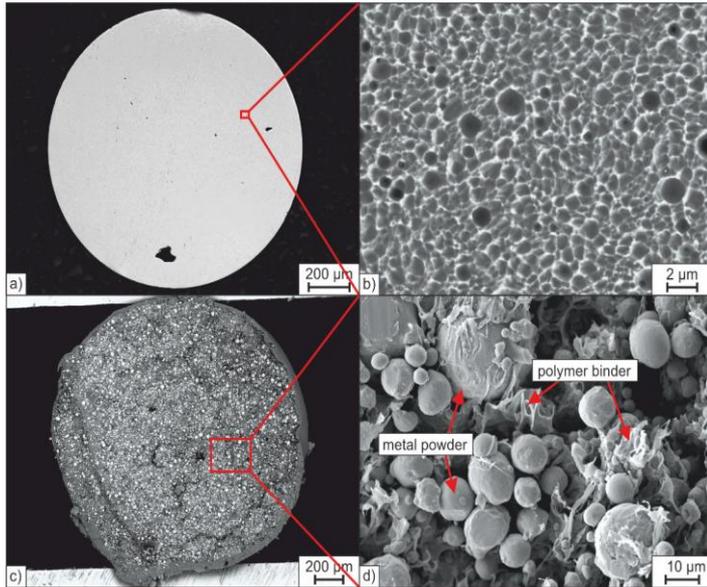
SEM micrographs of the starting powders used for a) PBF-EB, b) PFB-LB, and c) DED-LB.



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

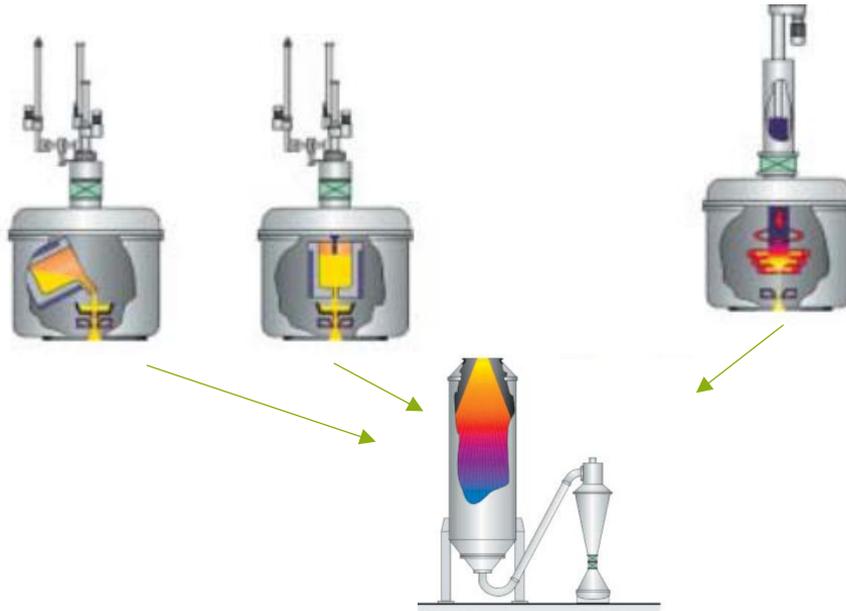


Verschiedene Fülldrähte für DED-LB/M oder DED-Arc/M

- 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

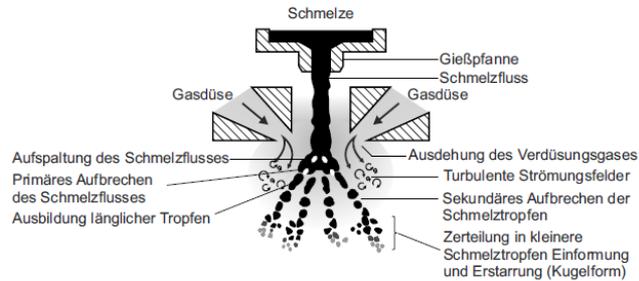
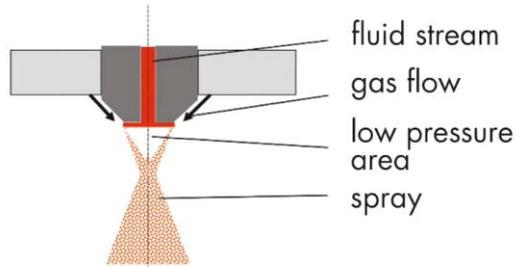
VIGA (vacuum induction gas atomization) EIGA (electrode induction gas atomization)



- VIGA = Tiegel-basiert (meist  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , teilweise  $\text{MgO}$  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



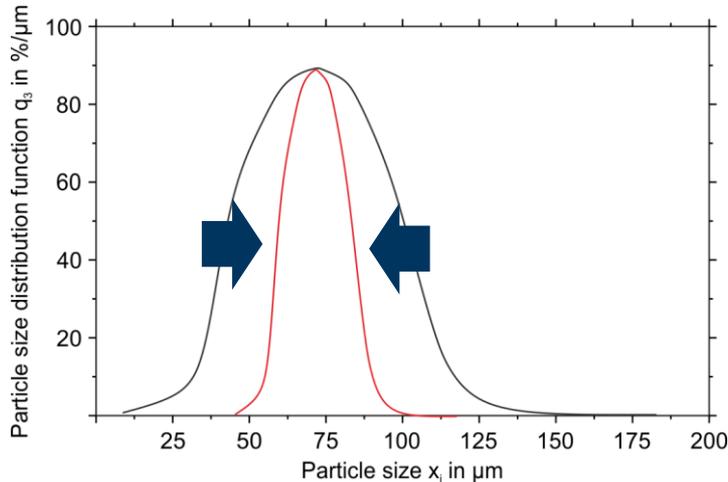
# VERFAHREN - VIGA

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

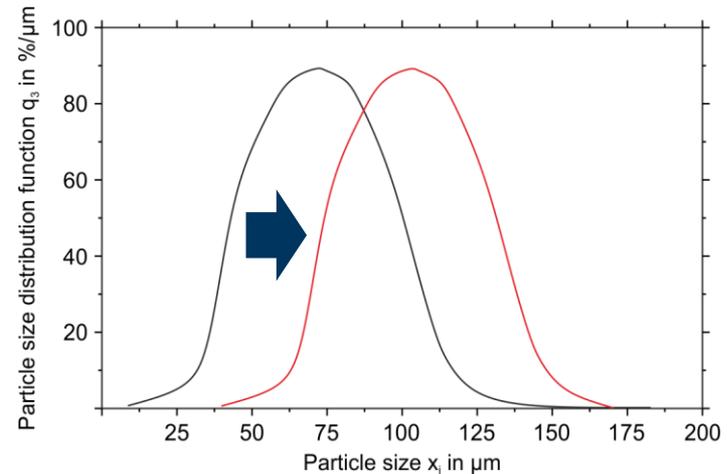


Können alle Legierungen mittels VIGA verdüst werden?

# 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  $\mu\text{m}$



## Optische Partikelanalyse

- Sympatec QICPIC
- Partikelgröße
- Partikelform
- 1,8  $\mu\text{m}$  – 1252  $\mu\text{m}$
- (bis 0,55  $\mu\text{m}$  nass)



## Vibrationssiebmaschine

- Retsch AS450 control

# VERFAHREN – Legierungen für AM

## Empfohlene Metalle für 3D-Drucke im Jahr 2017



Statista, Additive Fertigung Report, 2023

# VERFAHREN – Legierungen für AM

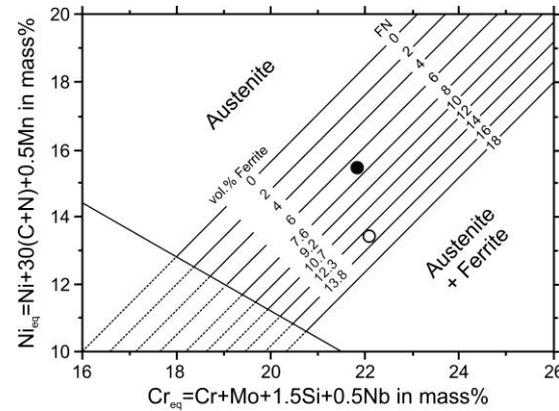
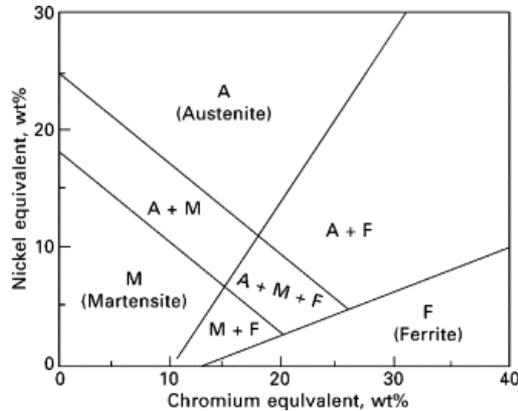
Rostfreie austenitische Stähle	316L
Ausscheidungshärtende Stähle	17-4PH (1.4542), M300 (1.2709)
Werkzeugstahl	H13
Alu	AlSi10Mg
	A205
Nickel-Legierung	IN718
	IN625
Titan-Legierung	Ti6Al4V
	Ti6242
Cobalt-Chrom-Legierung	MP1 (CoCrMo)
	MP2 (CoCrW)

# VERFAHREN – Werkstoffanforderungen

- Schweißbarkeit von Stählen
- Schöffler und Schöffler-DeLong-Diagramm

Ni equivalent = %Ni + %Co + 30(%C+%N) + 25(%N) + 0.5(% Mn) + 0.3(%Cu)%

Cr equivalent = %Cr + 2%Si + 1.5(%Mo) + 5(%V) + 5.5(%Al) + 1.75(%Nb) + 1.5(%Ti) + 0.75 (%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.
  - $M_s < T_{\text{prozess}}$
- Für Werkzeugstähle relevant
- Vermeidung Kaltrissbildung

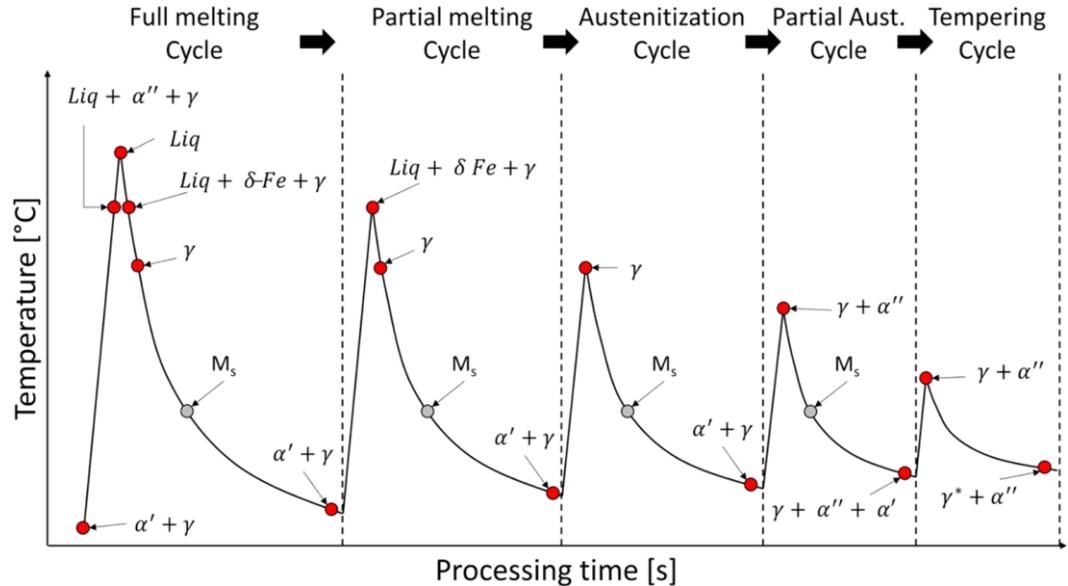
$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}$$

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

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)

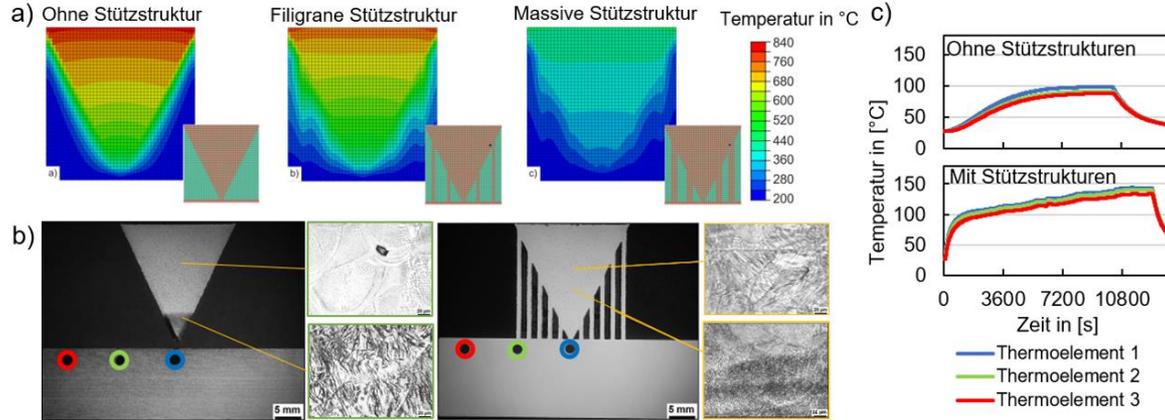
# MIKROSTRUKTUREN - Werkzeugstahl

- Zyklischer Temperatureintrag
- Hier Martensitbildung im Prozess

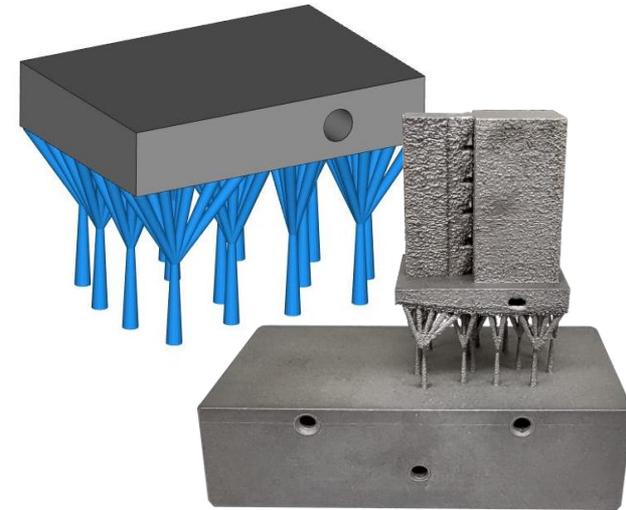


De F. Silveira et al. – <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103408>

# VERFAHREN – PBF-LB/M Wärmestau



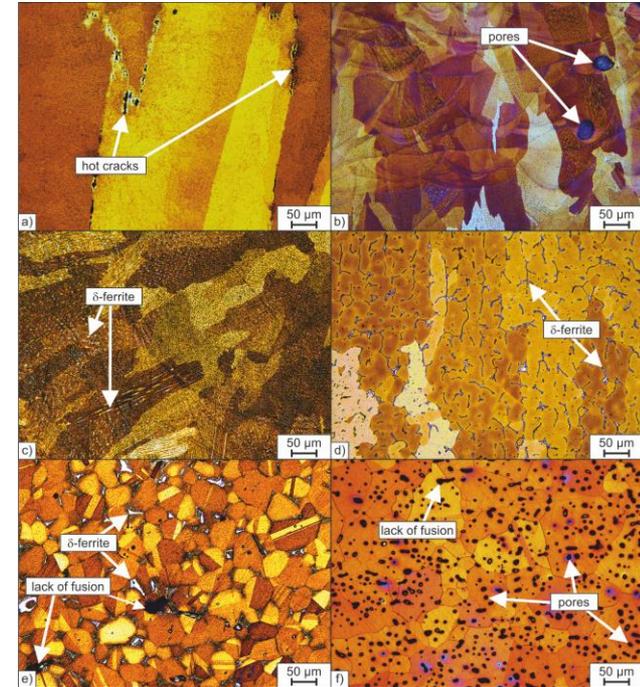
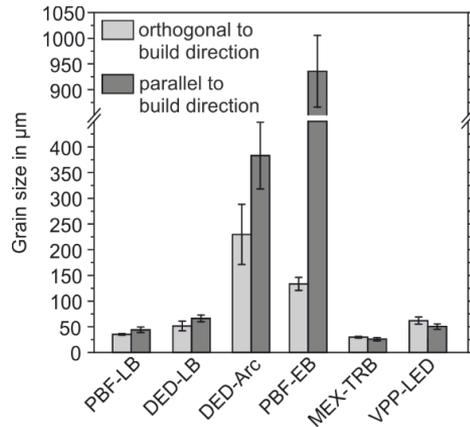
Thermisch  
isolierende  
Stützstrukturen



- Gezielte Nutzung des Wärmestau möglich?

# MIKROSTRUKTUREN

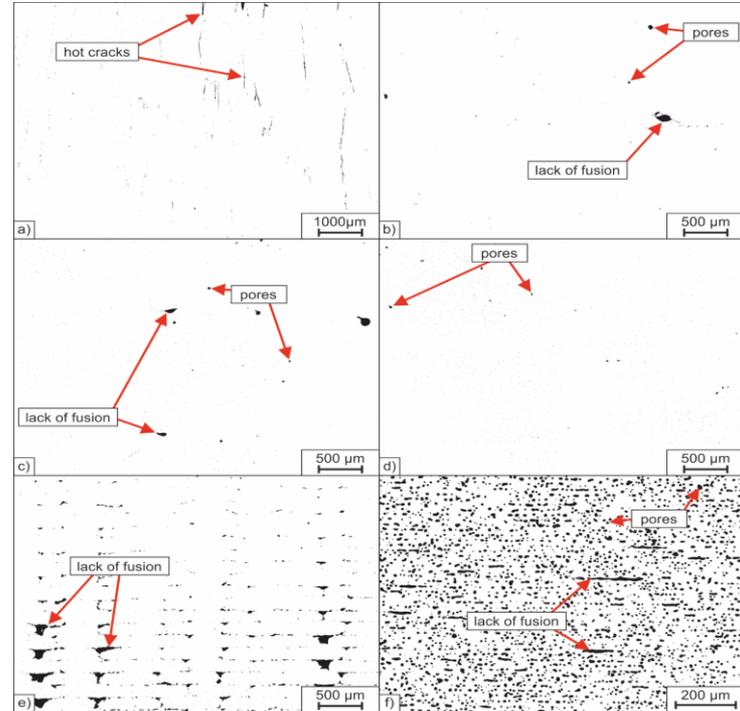
- Austenit: 1.4404, 316L, X2CrNiMo17-12-2
- Klarer Einfluss der Fertigungsverfahren auf Gefüge



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.

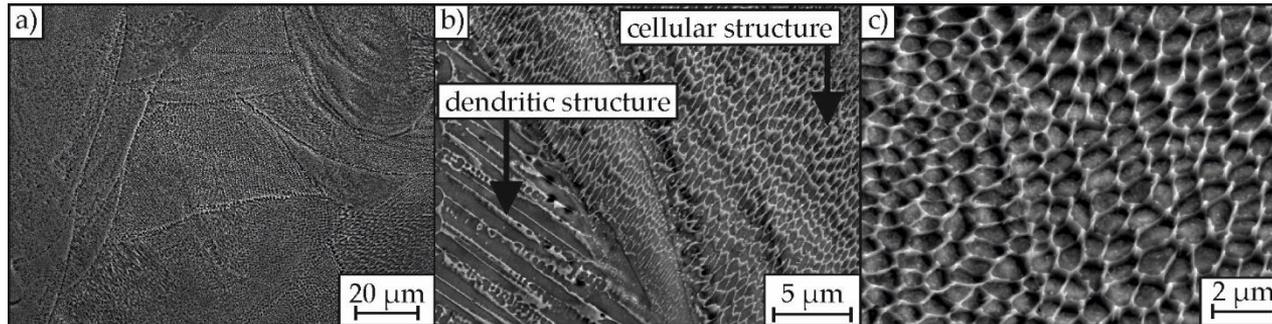
# MIKROSTRUKTUREN

- 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.

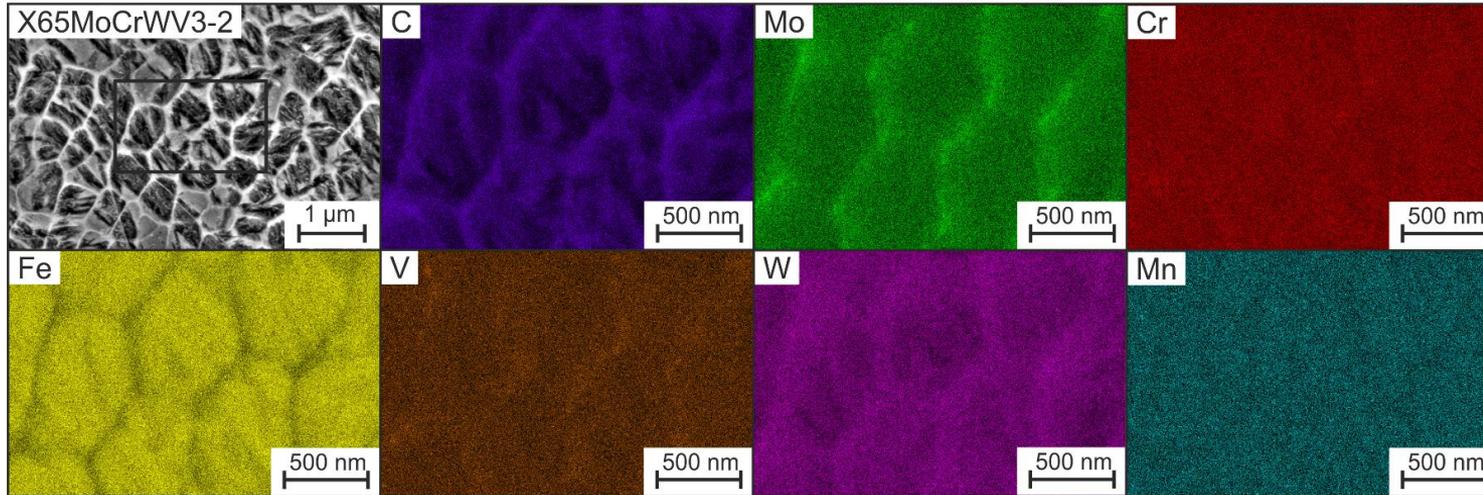
# MIKROSTRUKTUREN



*SEM-micrographs of the as-built microstructure of PBF-LB/M H1A 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 Mikrosegmentierungszellen

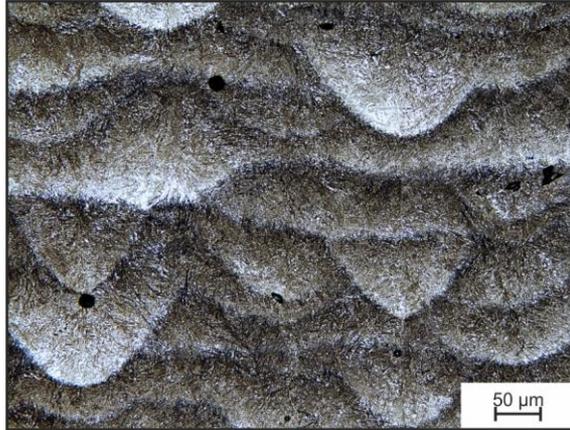
# MIKROSTRUKTUREN - Werkzeugstahl



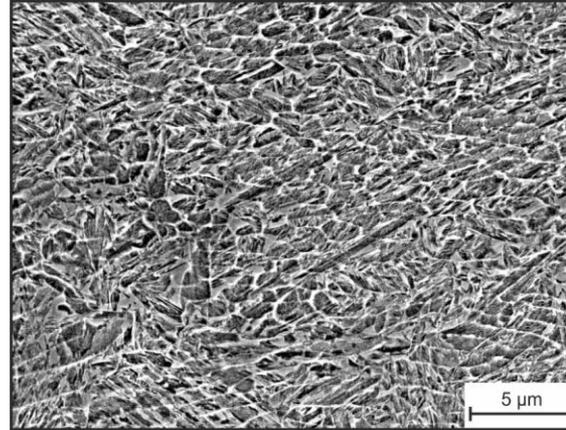
- PBF-LB/M mit Bauplattenvorwärmung über  $M_s$  → Keine Defekte
- Seigerung der „schwereren“ Elemente in Zellsäume → Zelle-Saum-Struktur

# MIKROSTRUKTUREN - Werkzeugstahl

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



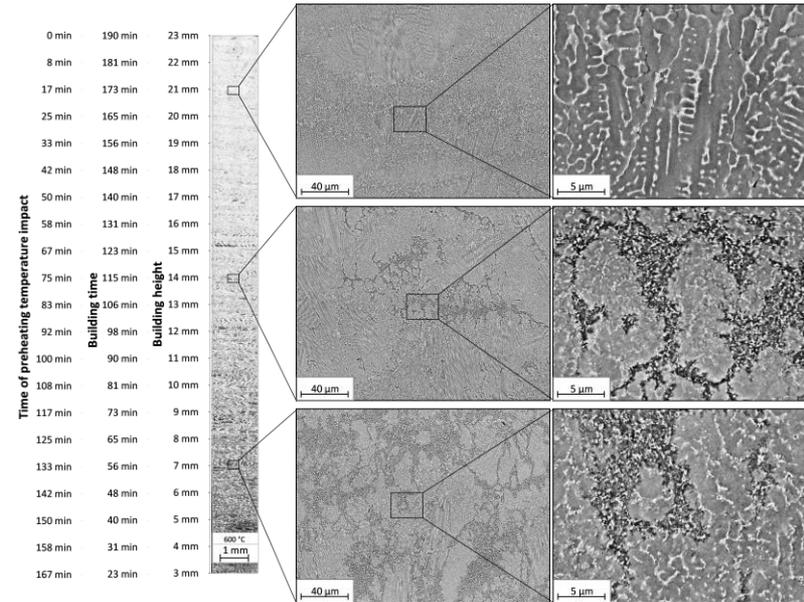
- Keine Kaltrisse
- Schmelzlinien einzelner Lagen sichtbar
- Geringe Porosität



- Zelle-Saum-Struktur
- Martensit mit Restaustenit

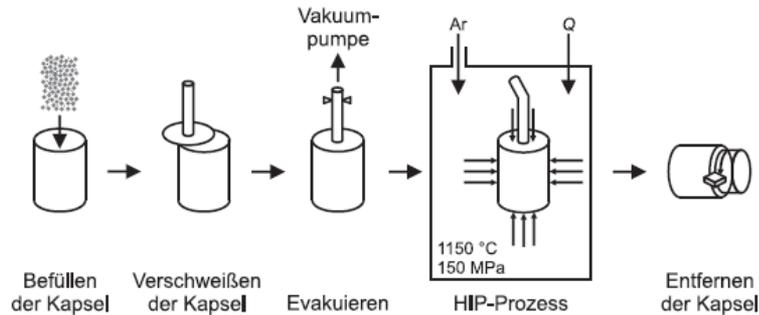
# MIKROSTRUKTUREN - Werkzeugstahl

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



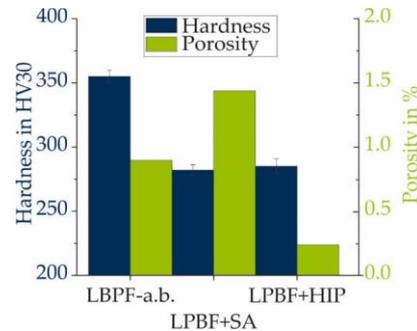
# POST PROCESSING

- 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

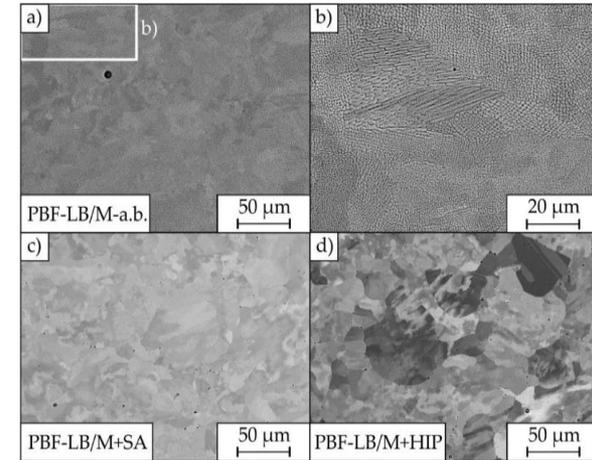


# POST PROCESSING

- 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

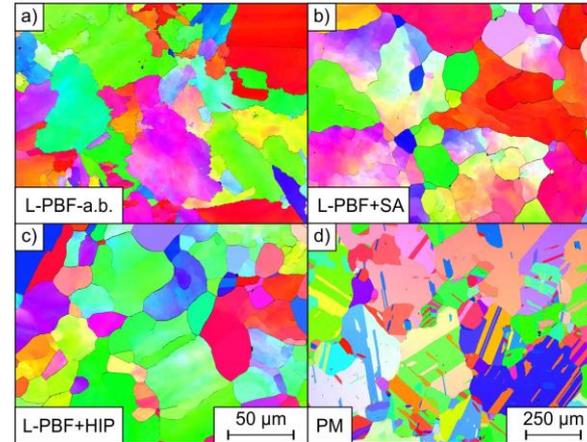
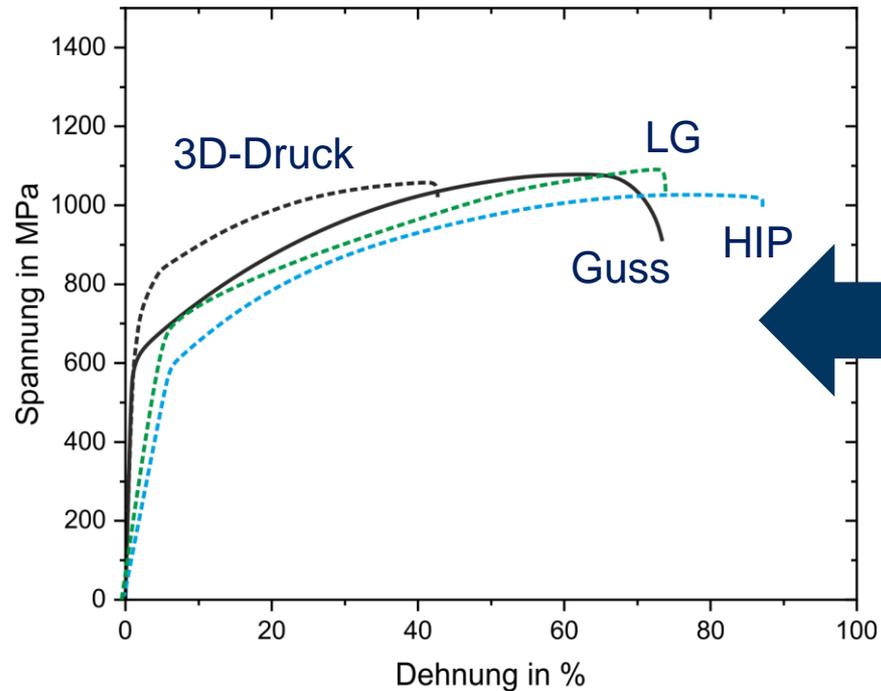


Hardness and porosity of the as-built and post-processed states of L-PBF HIA.



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

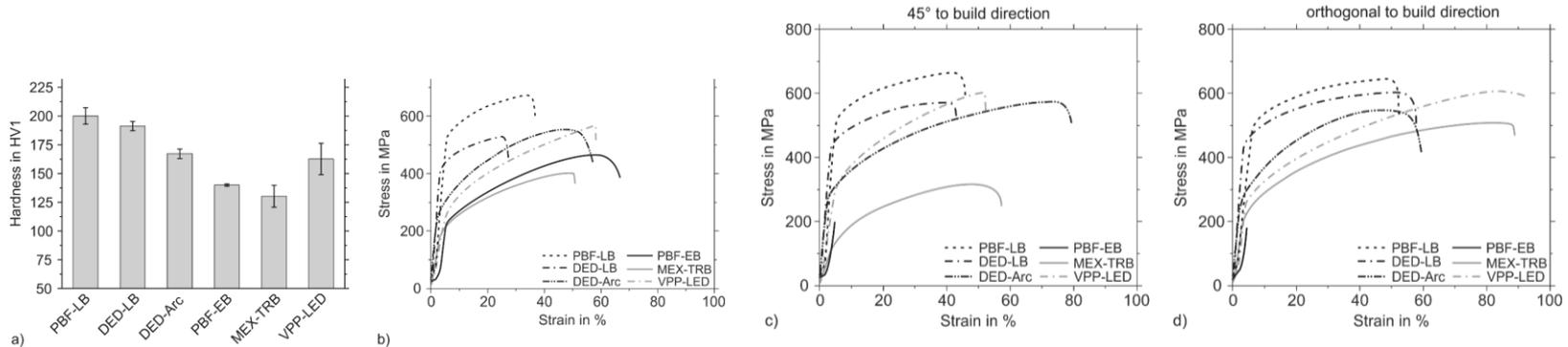
# MIKROSTRUKTUREN - Eigenschaften



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

# MIKROSTRUKTUREN - Eigenschaften

- Ausgeprägte Anisotropie
- Unterschiede zwischen Verfahren



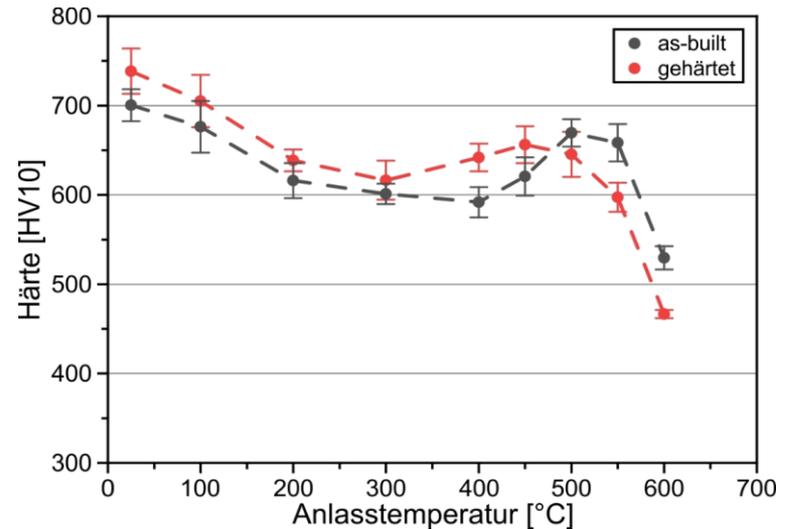
Mechanical properties of the additively manufactured 316L samples: a) Vickers hardness, b) tensile tests parallel to the build direction, c) tensile tests 45° to the build direction, and d) tensile tests orthogonal to the build direction.

# MIKROSTRUKTUREN - Eigenschaften

Veränderungen des Härte-Anlass-Verhaltens von Werkzeugstählen

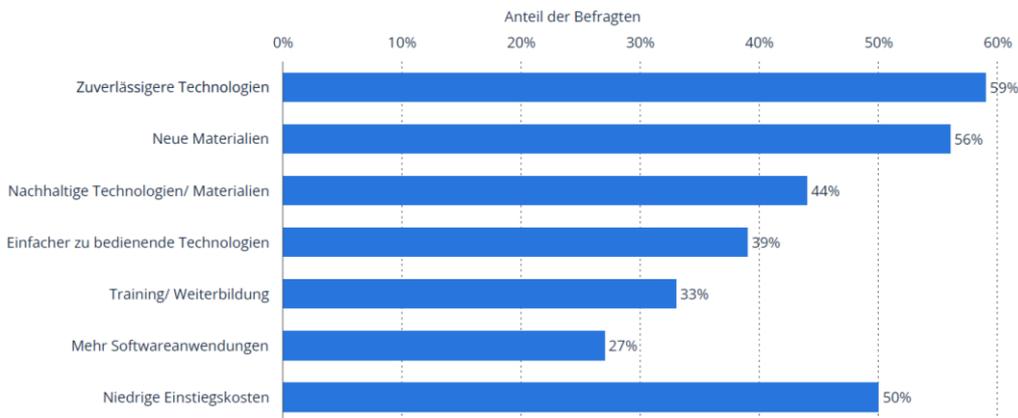
- Höherer Lösungszustand
- Temperatur-Historie?
- Verschiebung zu höheren Temperaturen

Anlassverhalten von 1.2343  
(as-built vs. gehärtet)



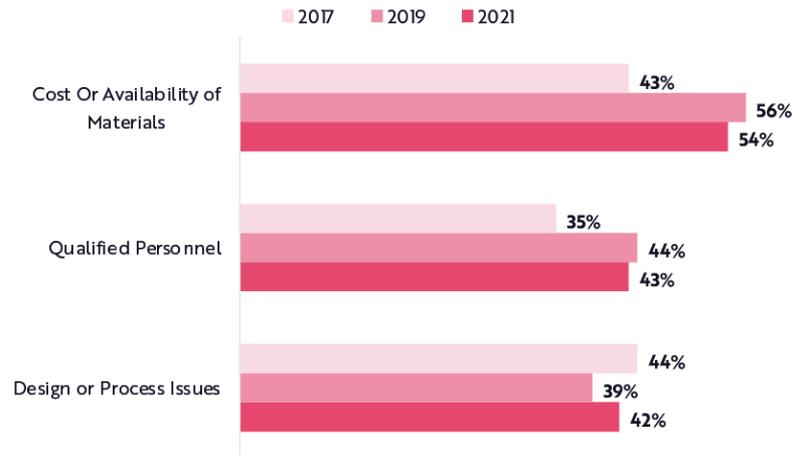
# AUSBLICK – Forschungsbedarf?

## 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?"

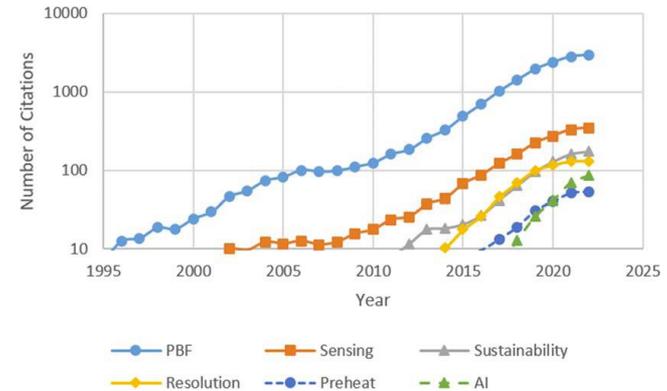


BIG IDEAS 2023, White Paper, ARK Investment Management LLC.

# 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>



© RSC Engineering / LMT Tools

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 zelluläre 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

RUHR  
UNIVERSITÄT  
BOCHUM

**RUB**

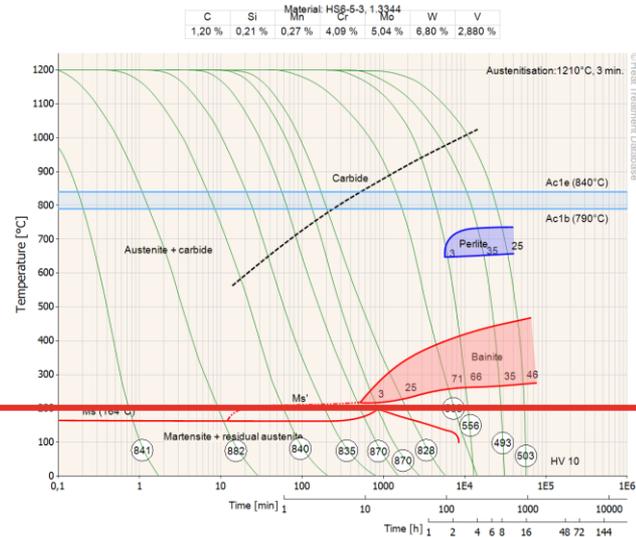
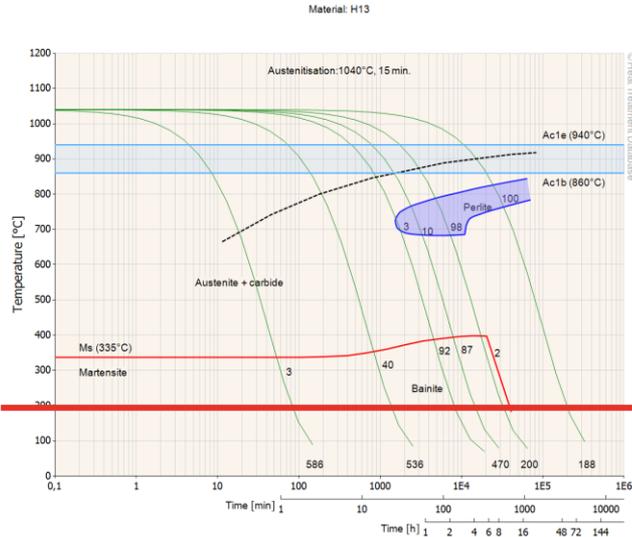
**voting.rub.de**

**9491 6330**



<https://voting.rub.de/p/94916330>

# 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](mailto:Lenzt@wtech.rub.de)