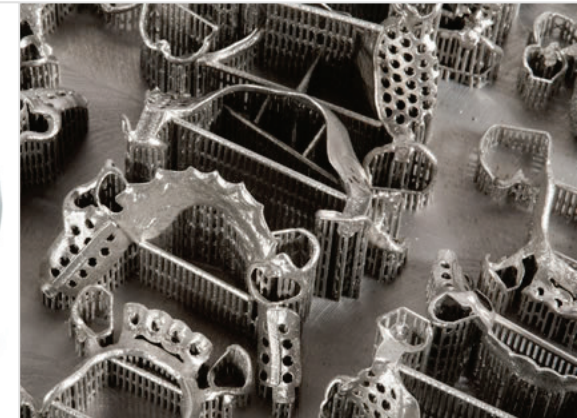
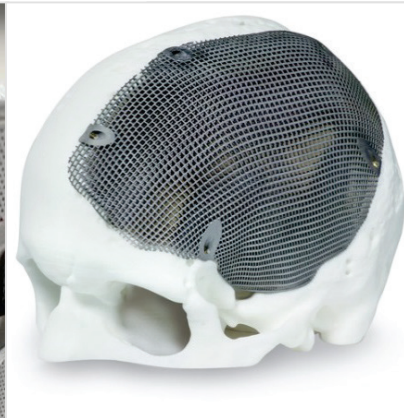
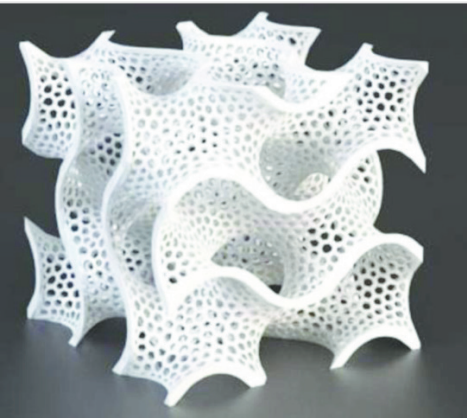
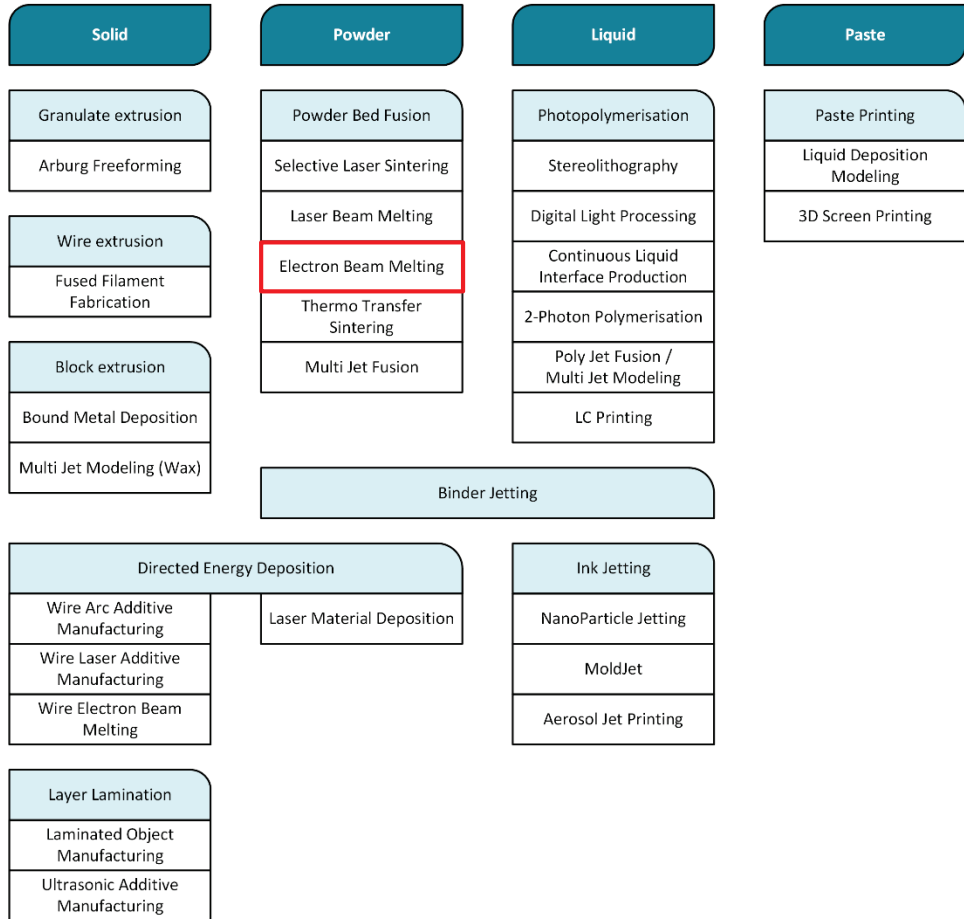


ADDITIVE FERTIGUNG – ELEKTRONENSTRAHLSCHMELZEN

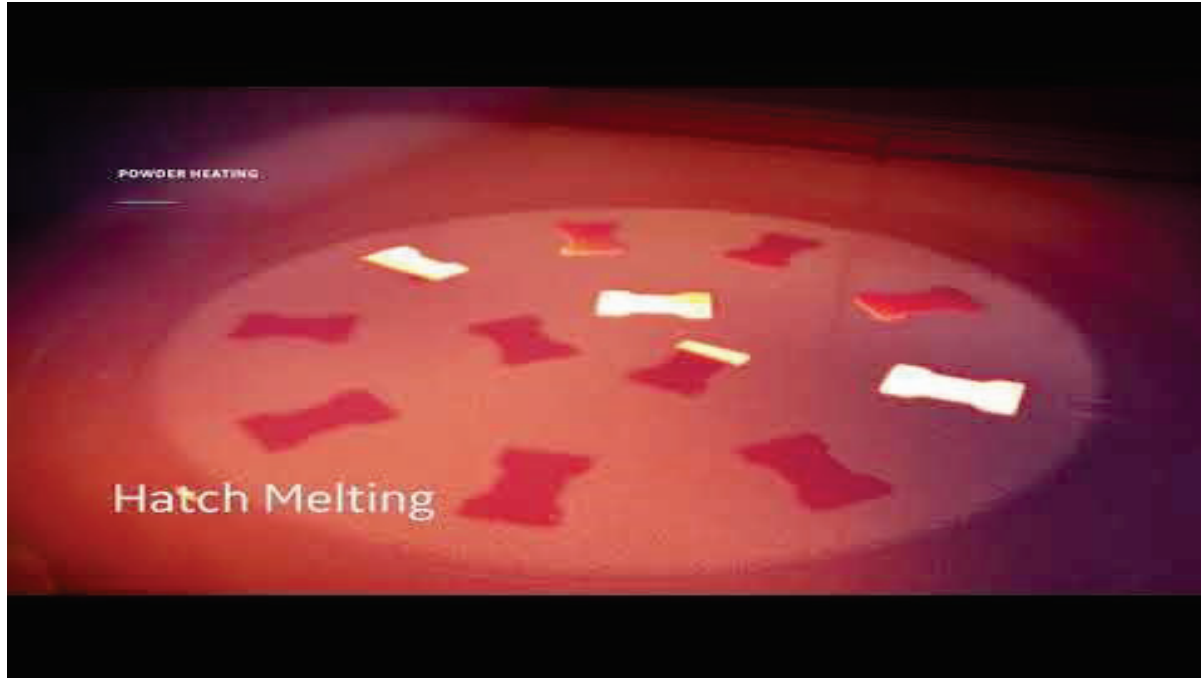


Sommersemester 2021

ELECTRON BEAM MELTING



ELEKTRONEN-STRAHLSCHMELZEN (EBM) – VIDEO



<https://youtu.be/CUeDevf6kyE>

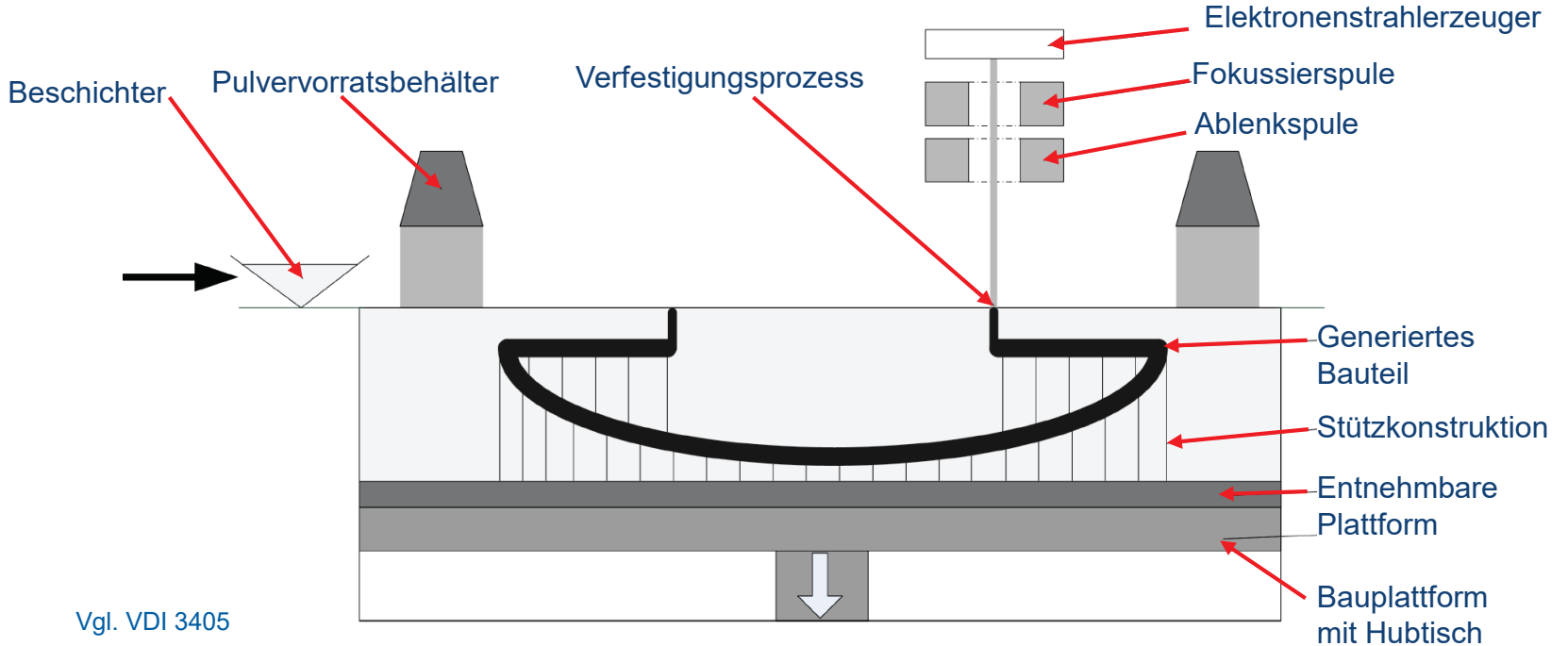
6 Additive Fertigungsverfahren – Powder bed fusion

EBM: KURZBESCHREIBUNG

Bauprozess	Schicht-für-Schicht-Bauprozess durch lokales Aufschmelzen pulverförmigen Materials mittels Elektronenstrahl und Verschmelzen (Verschweißen) beim Erstarren
Ausgangsmaterial	pulverförmig: in der Regel Metalllegierungen
Bindungsmechanismus	Physikalisch (thermisch)
Vorgehen bei Materialverarbeitung	Vektororientiert
Aktivierungsenergie	Bewegungsenergie der Elektronen
Postprozess	Stützkonstruktion entfernen; Verbesserung der Oberfläche durch Folgetechnologien

6 Additive Fertigungsverfahren – Powder bed fusion

EBM: KURZBESCHREIBUNG



Vgl. VDI 3405

EBM: ELEKTRONENSTRAHLTECHNIK

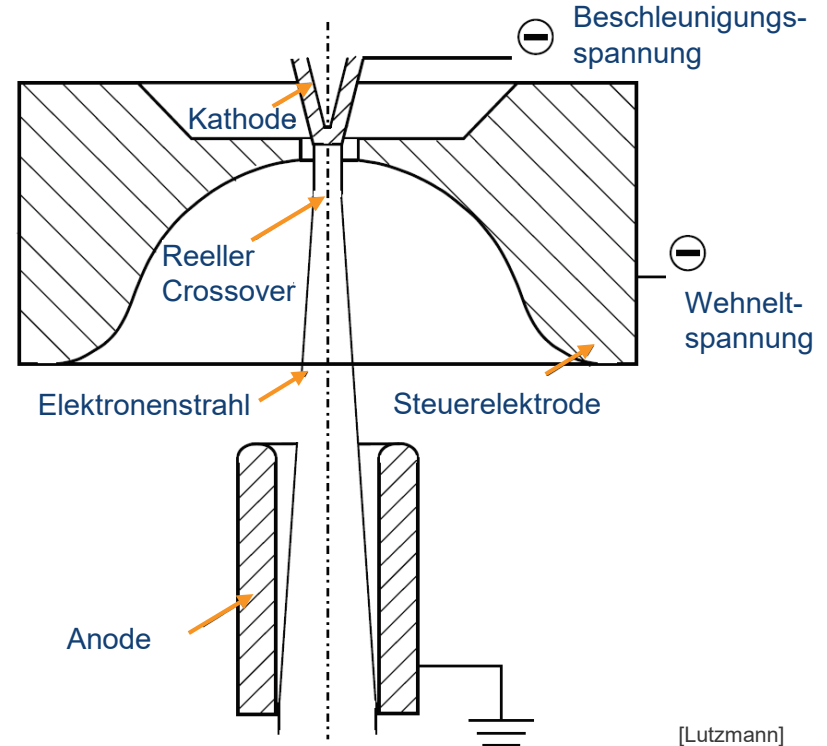
Erzeugung eines Elektronenstrahls

- Emission freier Elektronen geschieht primär mit Hilfe von Glühkathoden aus Wolfram oder Tantal
- Resultierende Potentialdifferenz durch Beschleunigungsspannung U_A
- Die entstehende Elektronenwolke erfährt eine Kraft in Richtung der Anode
- Geschwindigkeit nach Durchlaufen des Potentialfeldes:

$$v_e = c_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{(1 + e \cdot U_A \cdot m_0^{-1} \cdot c_0^{-2})} \right)^{1/2}$$

Mit:

- c_0 = Vakuum-Lichtgeschwindigkeit
- m_0 = Elektronenruhemasse
- U_A = Beschleunigungsspannung
- e = Elementarladung



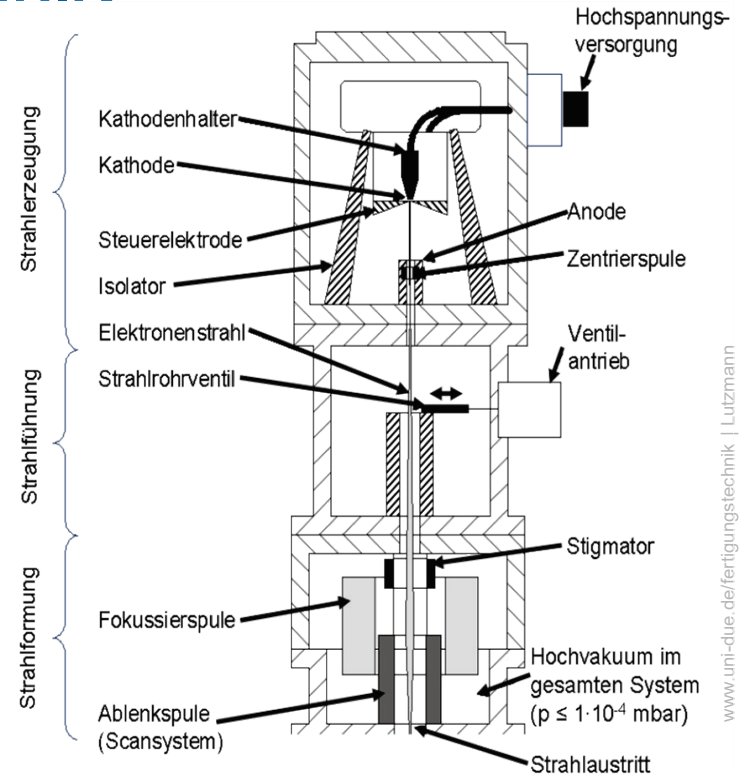
[Lutzmann]

6 Additive Fertigungsverfahren – Powder bed fusion

EBM: ELEKTRONENSTRAHLTECHNIK

Schematische Darstellung einer Elektronenstrahlkanone

- Korrektur des Strahls durch Zentrierspule
- Strahlrohrventil ermöglicht die hermetische Trennung der Strahlerzeugung
- Hochvakuum
 - Verhinderung der Oxidation der Glühkathode
 - Reduzierung der Kollisionen zwischen Elektronen und deutlich schwereren Luftmolekülen
 - Höhere Leistungsdichte des Strahls
- Korrektur des Strahls im Bereich der Strahlformung durch einen elektro-magnetischen Stigmator

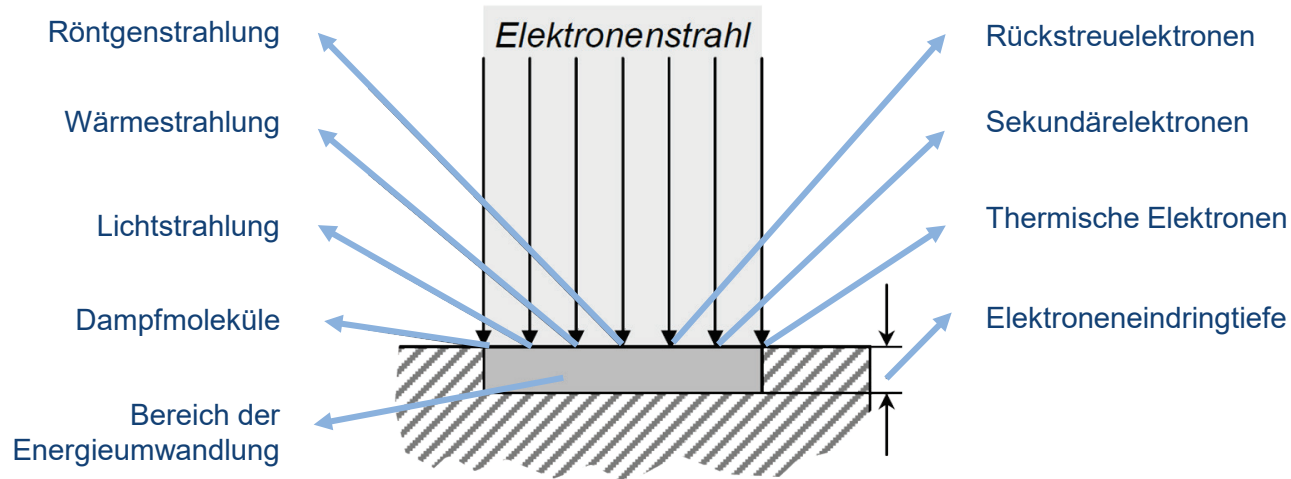


6 Additive Fertigungsverfahren – Powder bed fusion

EBM: ELEKTRONENSTRAHLTECHNIK

Vorgänge bei der Energieeinkopplung eines Elektronenstrahls in Metalle

- Umwandlung der kinetischen Energie des Elektronenstrahls in Wärme führt zur Temperaturerhöhung in der Strahleindringzone
- Strahlelektronen dringen in Pulverwerkstoff ein und kollidieren mit den freien Elektronen im Metallgitter
- Thermische Schwingungsenergie des Atoms wird erhöht



6 Additive Fertigungsverfahren – Powder bed fusion

EBM: WERKSTOFFE

Anforderung an den Werkstoff

Schichtweiser Pulverauftrag

- Fließverhalten des Pulvers ist für die Bauteilqualität entscheidend
 - Hohe Schüttdichte
 - Hohe Fließrate für gleichmäßigen Schichtauftrag

Weitere Eigenschaften

- Möglichst geringer Feinkornanteil: Sicherheitsaspekt, Vermeidung von Stäuben und Staubgefahr im Bauprozess
- Möglichst geringe Oberfläche: Vermeidung von Verunreinigungen
- Keine oder nur sehr geringe innere Porosität, da diese in das Bauteil übertragen wird

Baukammer

- Sphärische Partikel
- Sehr niedrige Verunreinigungsgehalte
- Partikelfraktion: 45 – 105 μm (LBM: 10 – 45 μm)

6 Additive Fertigungsverfahren – Powder bed fusion

EBM: WERKSTOFFE

- Prinzipiell sind viele metallischen Werkstoffe für den Prozess geeignet, solange die Pulver entsprechend angepasst werden können
- Pulver, welche kommerziell erhältlich sind:
Titan Grade 2, Ti-6Al-4V, CoCr, Inconel 718 (Nickel-Basis-Legierung)

Pulver im Forschungsstadium

- Aluminium und seine Legierungen
- Superlegierungen
- Intermetallische Werkstoffe
- Refraktärmetalle und -legierungen



6 Additive Fertigungsverfahren – Powder bed fusion

EBM: AUFBAU EINER ELEKTRONENSTRAHLSCHMELZANLAGE

Elektronenstrahlkanone

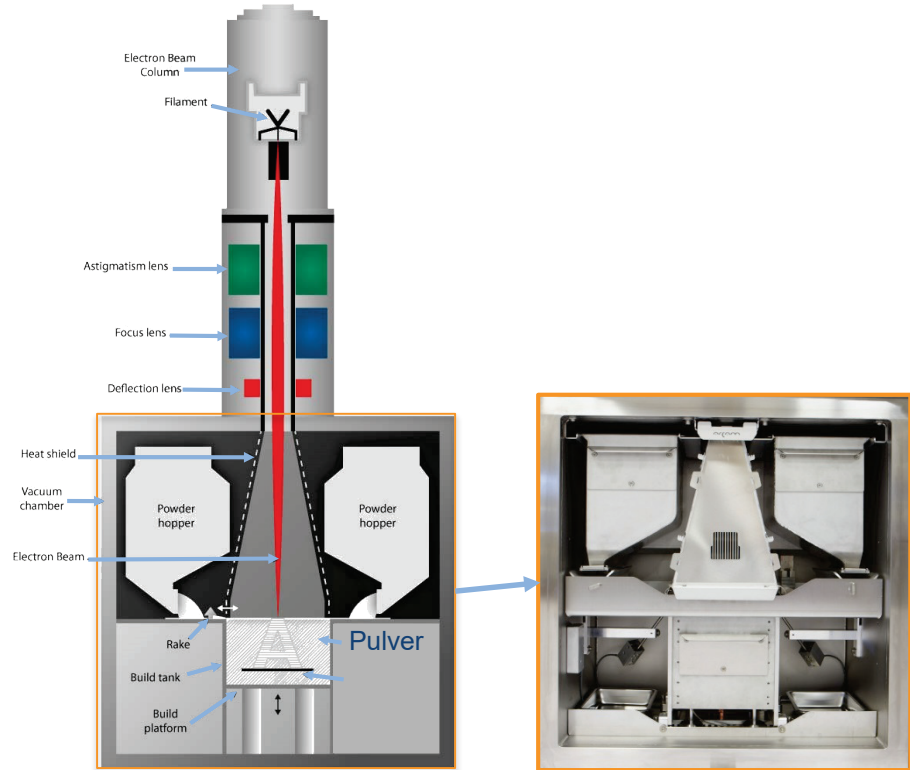
- Erzeugung des Elektronenstrahls

Elektronenstrahlsäule

- Korrektur Strahlform
- Einstellung Strahlfokus
- Ablenkeinheit

Baukammer

- Pulverzuführung
- Pulverauftrag
- Absenkung Bauplattform



6 Additive Fertigungsverfahren – Powder bed fusion

EBM: ALLGEMEINE EIGENSCHAFTEN

„Heißer“ Prozess

- Pulverbett wird auf erhöhter Temperatur gehalten
 - Versinterung der Pulverpartikel
 - Stützwirkung, Vermeidung von Pulverstaub

Atmosphäre

- Prozess läuft unter Hochvakuum, da der Elektronenstrahl nur in dieser Atmosphäre betrieben werden kann
 - Verarbeitung hochreaktiver Werkstoffe möglich

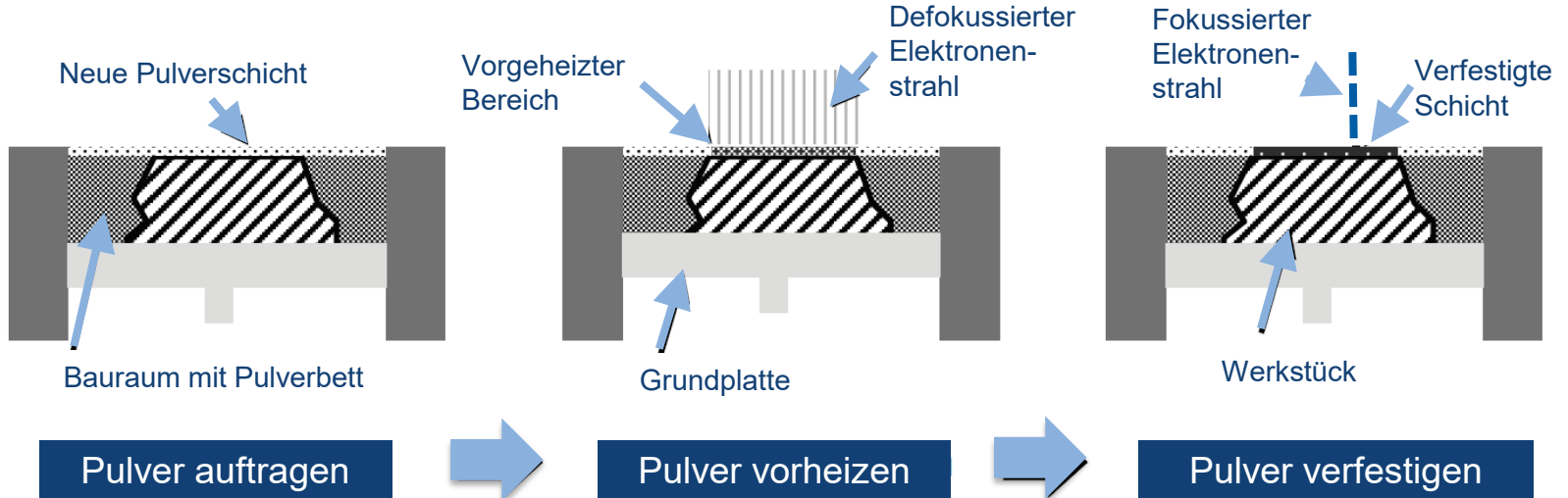
Baukammer

- Keine beweglichen Teile außer dem Rakelsystem und Absenkung Bauplattform
- Sehr hohe Ablenkraten (>1000 m/s) des Elektronenstrahls möglich

6 Additive Fertigungsverfahren – Powder bed fusion

EBM: BAUPROZESS

Allgemeiner Verfahrensablauf

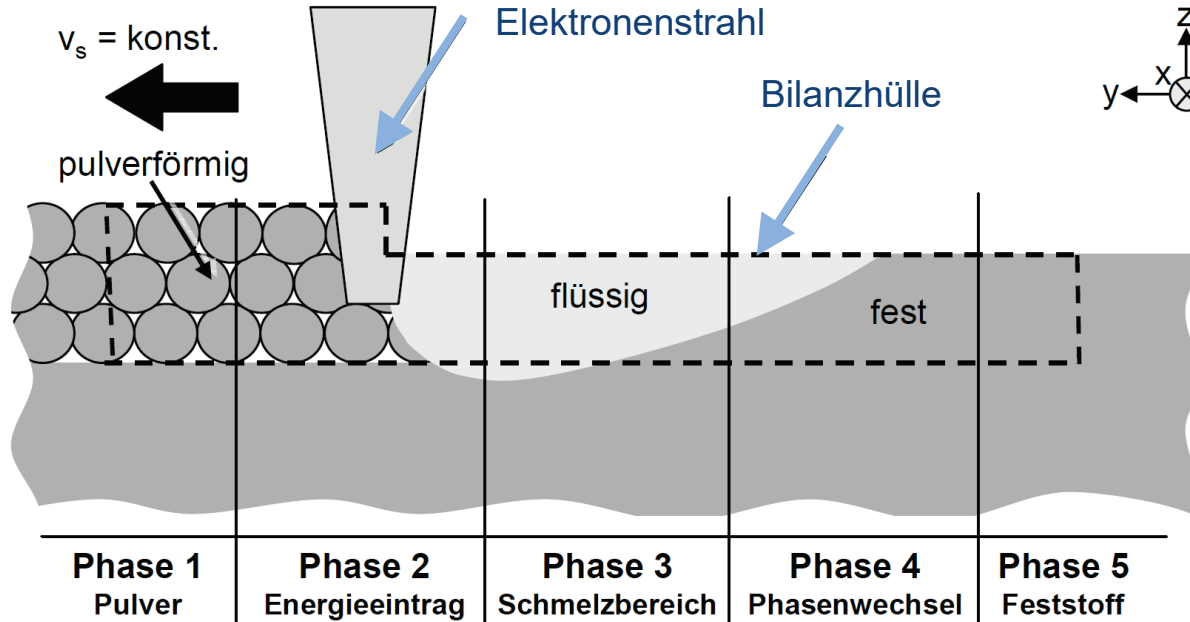


6 Additive Fertigungsverfahren – Powder bed fusion

EBM: BAUPROZESS

Schema der Prozesszone mit Bilanzhülle

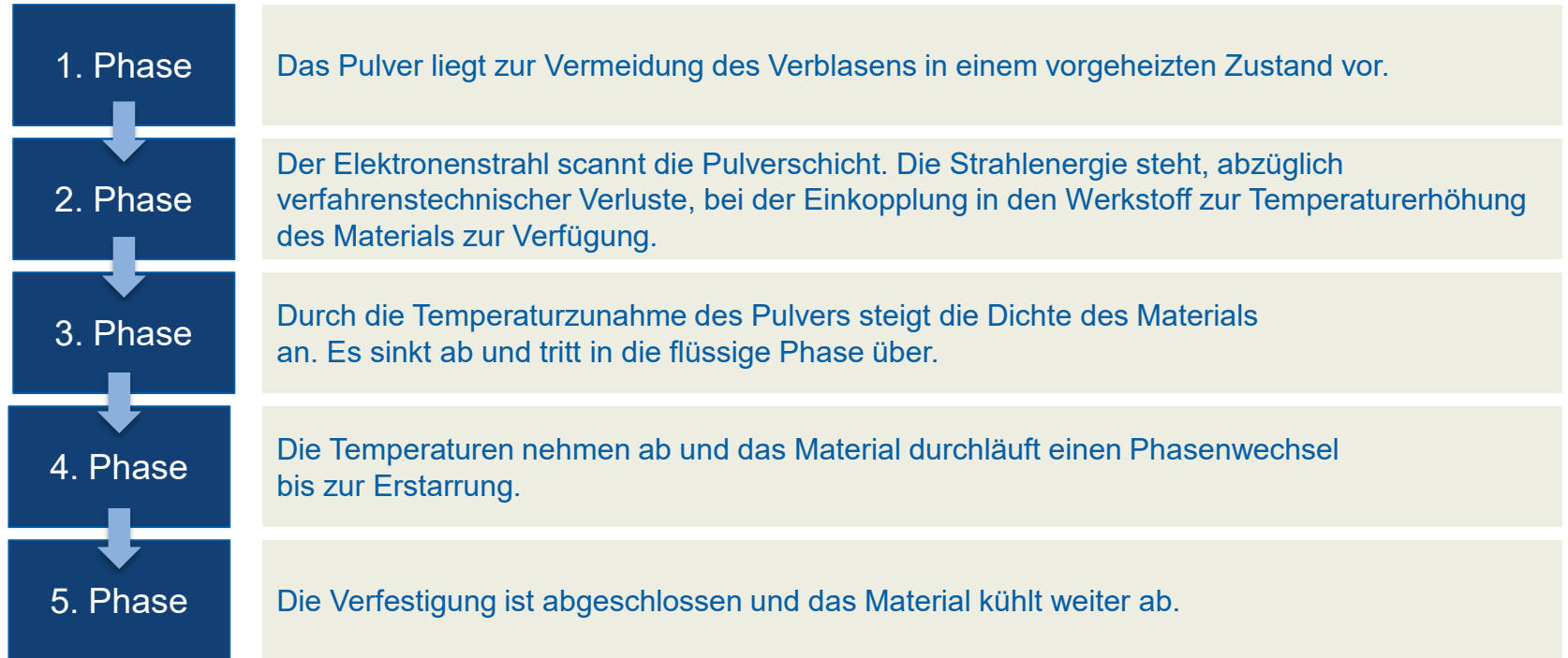
- Strahlauftreffbereich verbleibt nur ausgesprochen kurz an einer Stelle



6 Additive Fertigungsverfahren – Powder bed fusion

EBM: BAUPROZESS

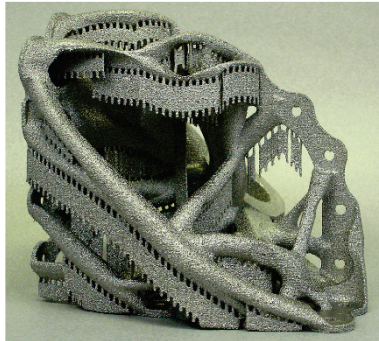
Fünf Phasen bis zur Verfestigung des Pulvers



6 Additive Fertigungsverfahren – Powder bed fusion

EBM: SUPPORTSTRUKTUREN

- Supportstrukturen an starken Überhängen notwendig
- Geringere Temperaturdifferenz zwischen Bauraum und Schmelzbad (im Vergleich zum LBM): Verankerung auf der Bauplattform nicht zwingend notwendig



Beschreibung	numerische Werte für Ti-6Al-4V	nicht fertigungsgerecht	fertigungsgerecht
Die Anbindung der Stützstruktur muss nicht an die Bauplatte oder an darunterliegende Struktur erfolgen, solange eine minimale Höhe eingehalten wird. Je massiver die zu stützende Struktur und je größer SL _a , umso größer ist diese zu wählen.	$5 \text{ mm} \leq Sh \leq 20 \text{ mm}$, bzw. bis BE oder darunterliegende Struktur		
Überhänge, deren Downskin-Fläche parallel zur Bauebene verläuft, benötigen nur an den Randbereichen Stützstrukturen. Die darin eingeschlossene Fläche ist selbsttragend.			

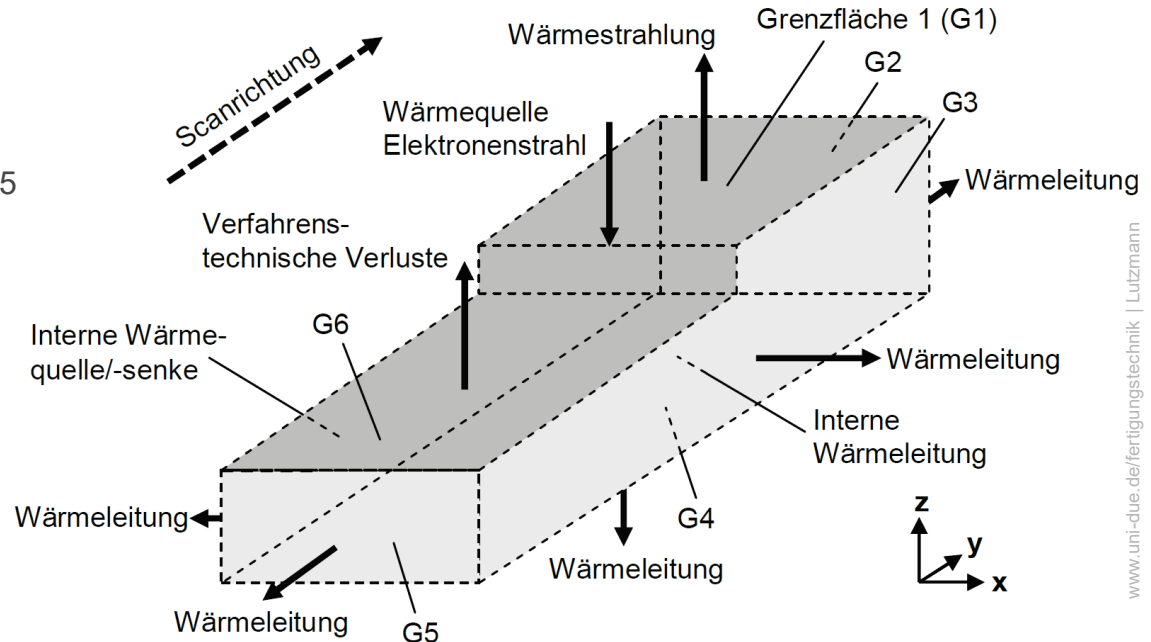
6 Additive Fertigungsverfahren – Powder bed fusion

EBM: BAUPROZESS

Bilanzhülle mit thermisch relevanten Größen für das Elektronenstrahlschmelzen

Grenzen der Bilanzhülle

- In x-Richtung: die Breite des Strahldurchmessers
- In y-Richtung: die Abmessungen der Prozesszone von Phase 1 bis 5
- In z-Richtung: die Höhe einer Pulverschicht

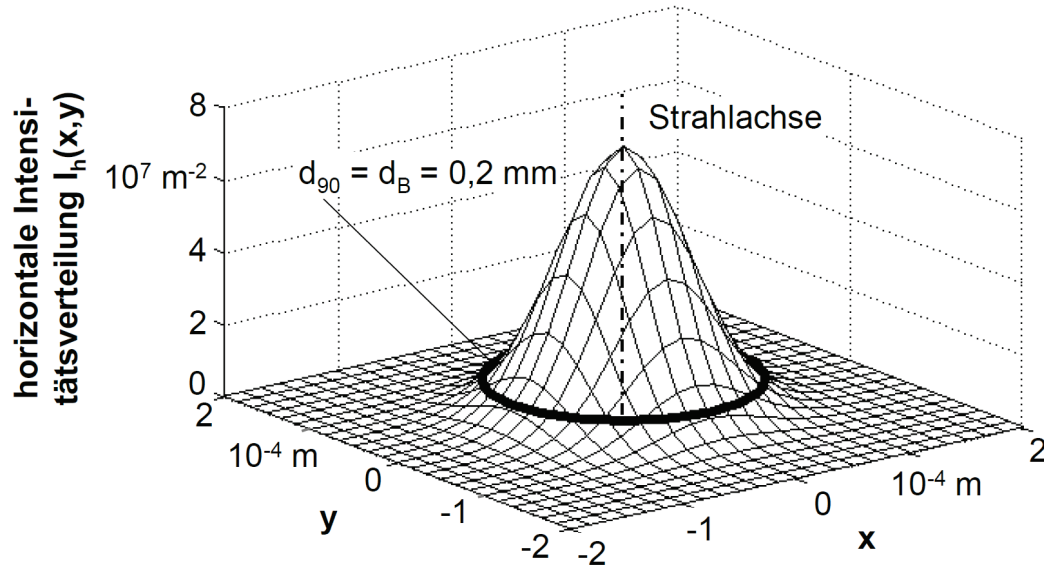


6 Additive Fertigungsverfahren – Powder bed fusion

EBM: BAUPROZESS

Horizontale Intensitätsverteilung der Leistung des Elektronenstrahls

- Näherung über normalverteilte, zweidimensionale Dichtefunktion:

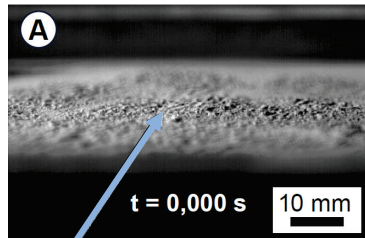


6 Additive Fertigungsverfahren – Powder bed fusion

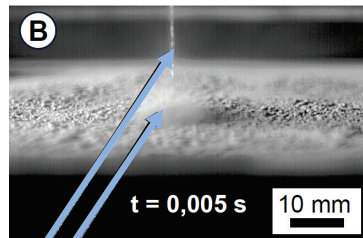
EBM: BAUPROZESS

Fehlerbild Pulververblasen

- Beschleunigung der aufgetragenen Partikel unter bestimmten Prozessbedingungen
- Zu beobachten, wenn die aufgetragene Schicht bei Raumtemperatur mit dem Elektronenstrahl beaufschlagt wird
- Zuletzt aufgebrachte Pulverschicht wird zerstört, wodurch der Schichtauftrag wiederholt werden muss

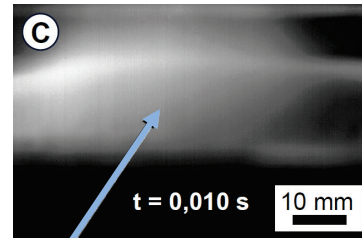


Ruhende Pulverschicht

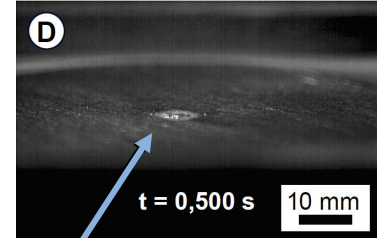


Beginn des Pulverblasens

Elektronenstrahl



Pulverwolke



Grundplatte ohne Pulverschicht

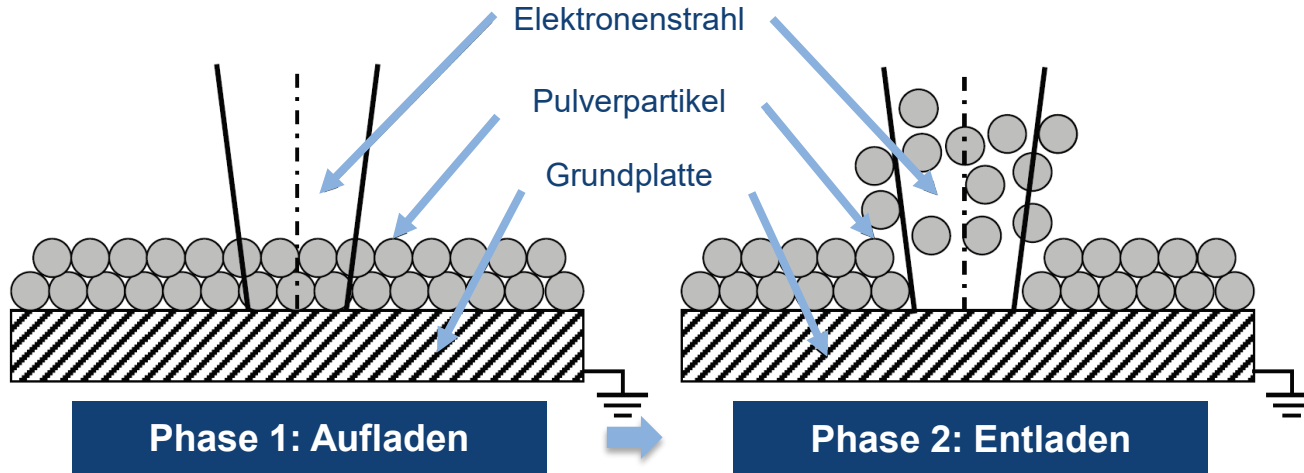
6 Additive Fertigungsverfahren – Powder bed fusion

EBM: BAUPROZESS

Erklärungsansatz zum Pulververblasen

- Elektrostatische Effekte sowie Impulsübertragung üben durch bewegte Ladungsträger des Elektronenstrahls Kräfte auf die Partikel aus
- Thermodynamische und elektrodynamische Effekte sind auszuschließen

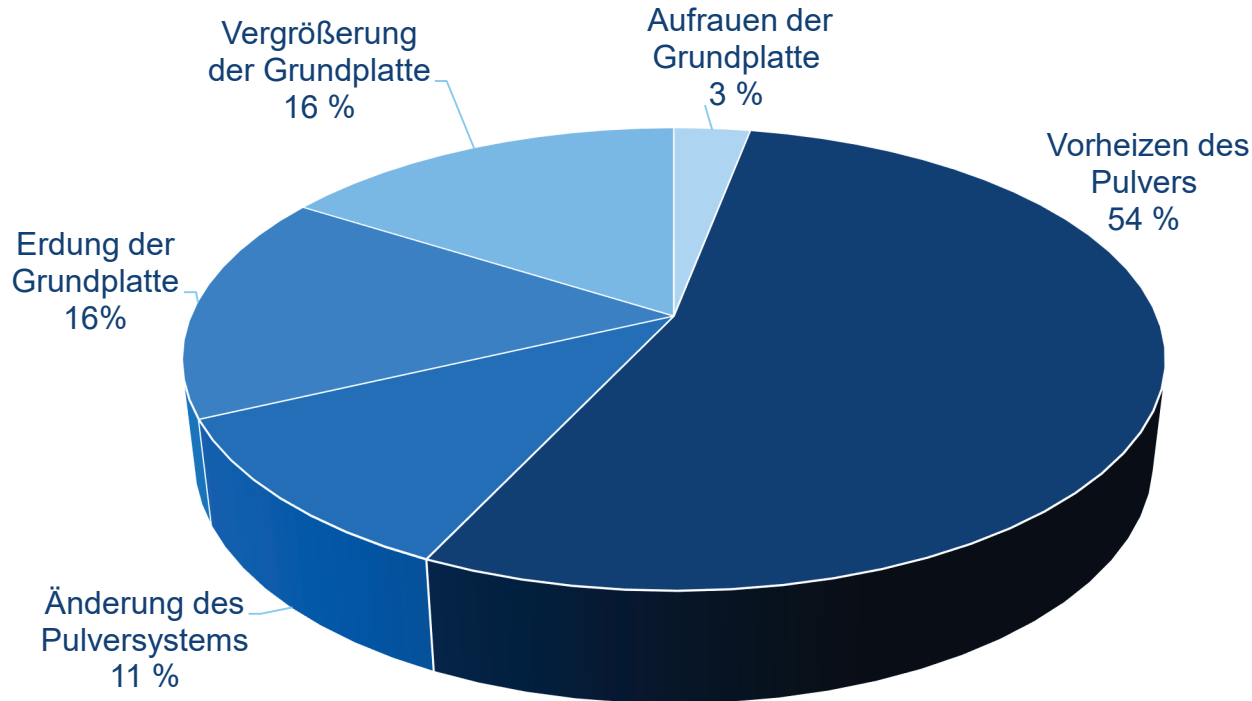
Zwei-Phasen-Modell des Pulververblasens:



6 Additive Fertigungsverfahren – Powder bed fusion

EBM: BAUPROZESS

Bewertung der Wirksamkeit der Maßnahmen zur Vermeidung des Pulververblasens

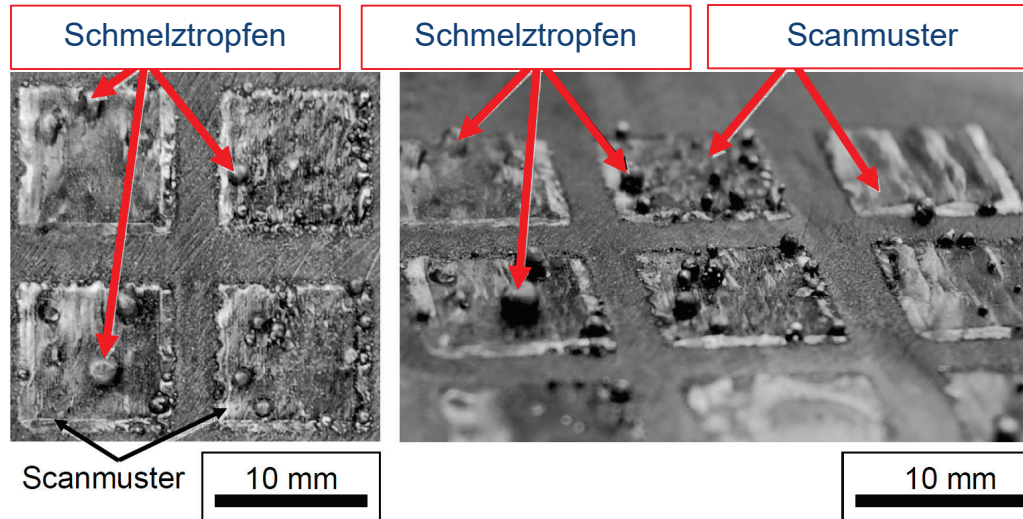


6 Additive Fertigungsverfahren – Powder bed fusion

EBM: BAUPROZESS

Fehlerbild Schmelztropfenbildung

- Bezeichnet das Phänomen der Ausbildung einer Vielzahl kugelförmiger Körper aus dem aufgeschmolzenen Material
- Anhäufungen verbinden sich nur teilweise mit der darunterliegenden Schicht
→ Verringerung der Dichte und Oberflächengüte



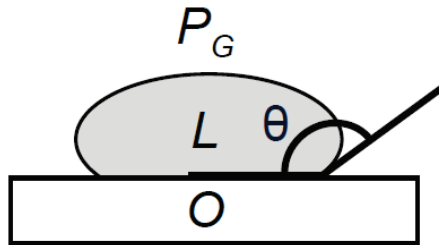
6 Additive Fertigungsverfahren – Powder bed fusion

EBM: BAUPROZESS

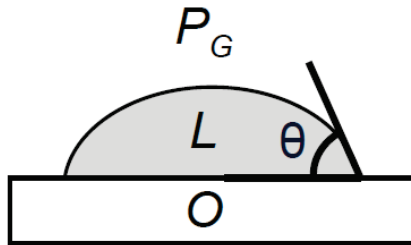
Erklärungsansatz zur Schmelztropfenbildung

- Auftreten von Schmelztropfen zeugt von einer unzureichenden Benetzung des aufgeschmolzenen Materials
- Als treibende Kraft ist die Oberflächenspannung der Schmelze zu sehen

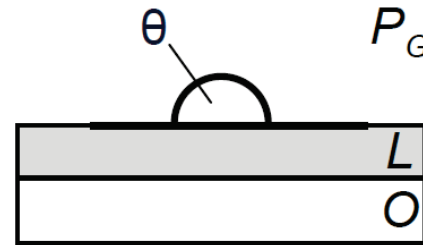
Schlechte Benetzung



Gute Benetzung



Totalbenetzung



P_G = Gasphase

L = Flüssigphase

O = feste Oberfläche

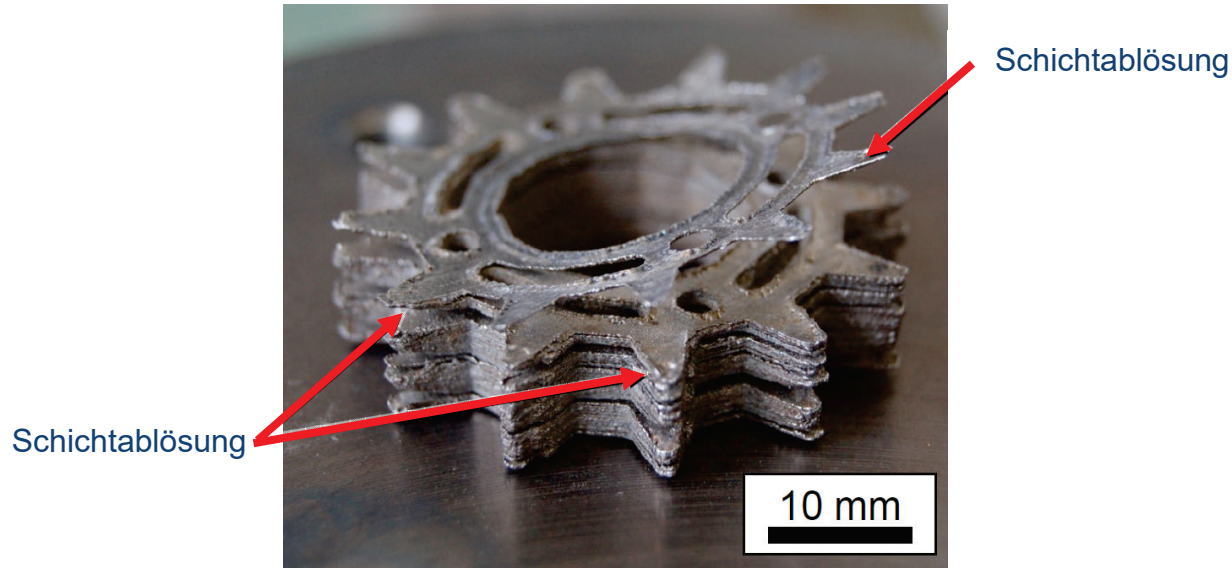
Θ = Kontaktwinkel

6 Additive Fertigungsverfahren – Powder bed fusion

EBM: BAUPROZESS

Fehlerbild Schichtablösung

- Material ist als zusammenhängendes und massives Gefüge bereits erstarrt
- Eine oder mehrere Lagen lösen sich von der darunterliegenden Schicht

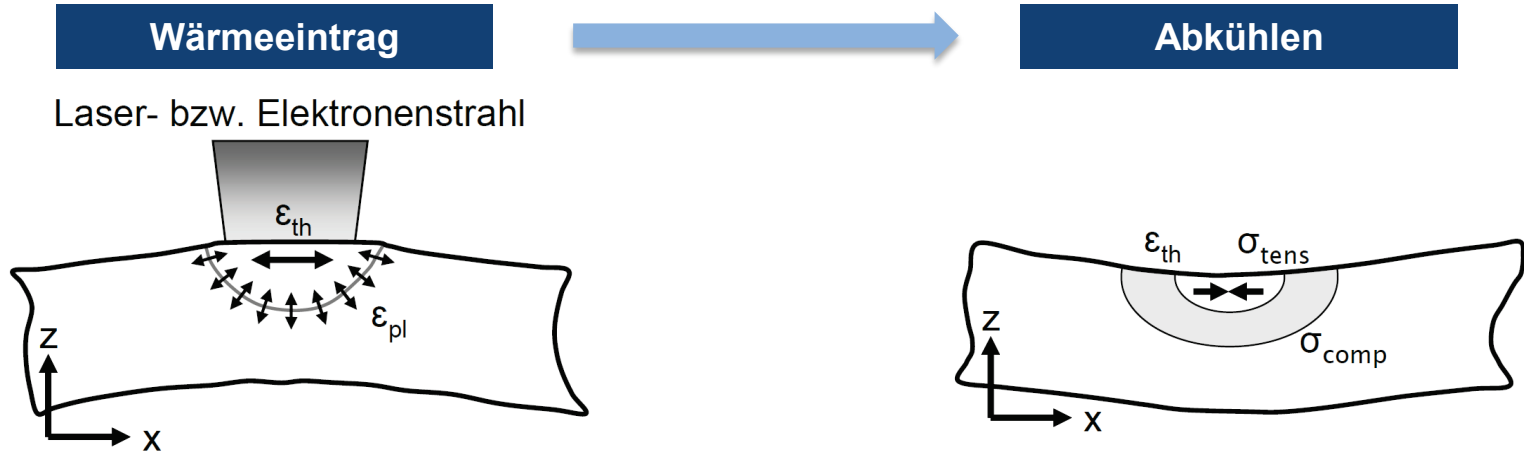


6 Additive Fertigungsverfahren – Powder bed fusion

EBM: BAUPROZESS

Erklärungsansatz zur Schichtablösung

- Eigenspannungen führen zur Schichtablösung sowie zu unerwünschten Deformationen
- Auf Grund der Wärmedehnung der aufgeheizten Bereiche ergeben sich Druckspannungen und Verformungen im Material
- Plastische Verformung bei Überschreitung der Druckspannungen über die Dehngrenze des Materials hinaus

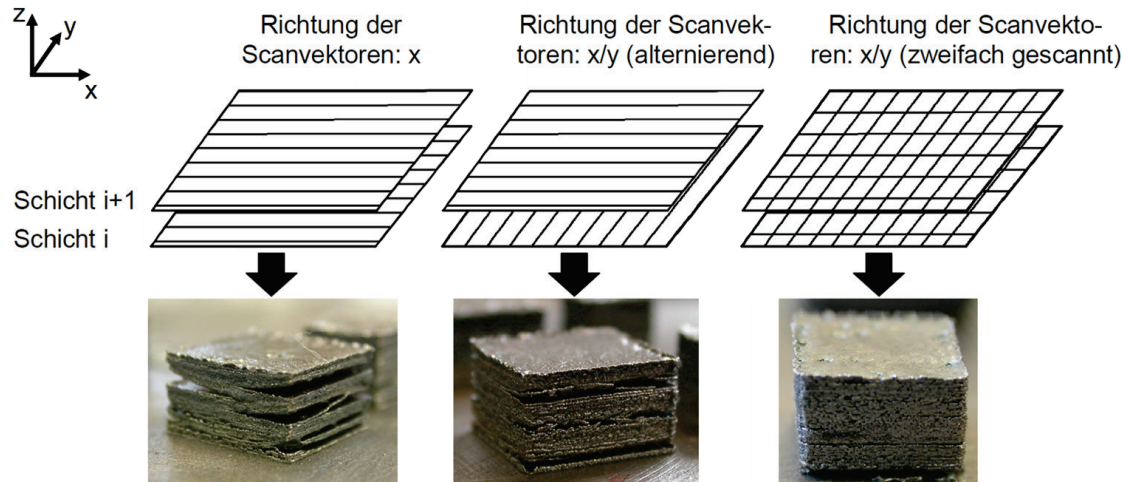


6 Additive Fertigungsverfahren – Powder bed fusion

EBM: BAUPROZESS

Schichtanbindungsverhalten in Abhängigkeit der Orientierung der Scanvektoren

- Angepasste Scanstrategien zur Vermeidung zu hoher Eigenspannungen
- Aufteilung des zu scannenden Bereiches in eine Vielzahl verschiedener Muster
 - Sequentielle, nach dem Zufallsprinzip Verfestigung der Muster

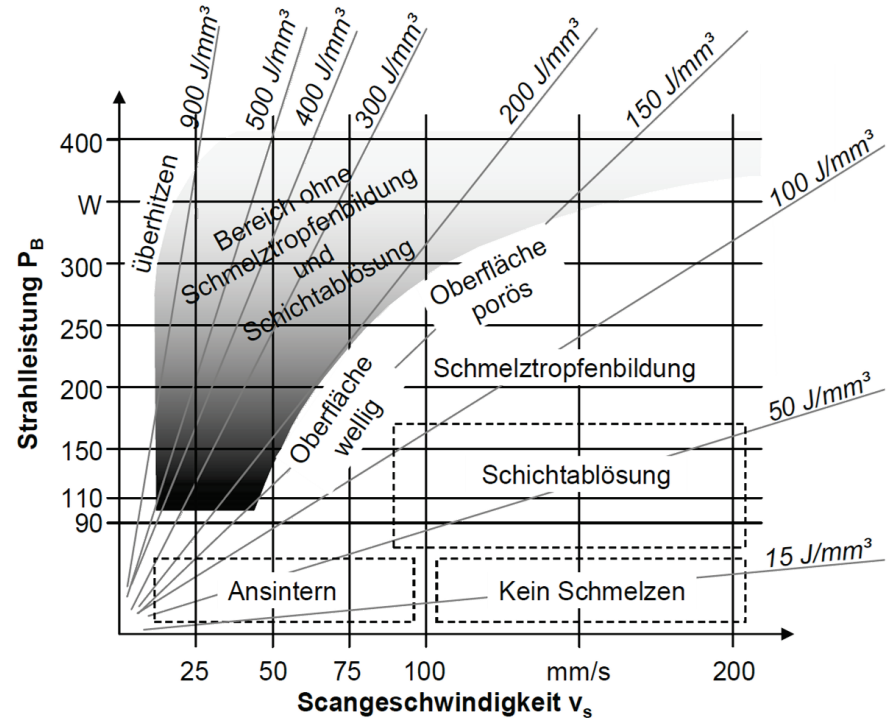


➔ Verbesserung der Schichtanbindung

EBM: BAUPROZESS

Prozessparameterfenster

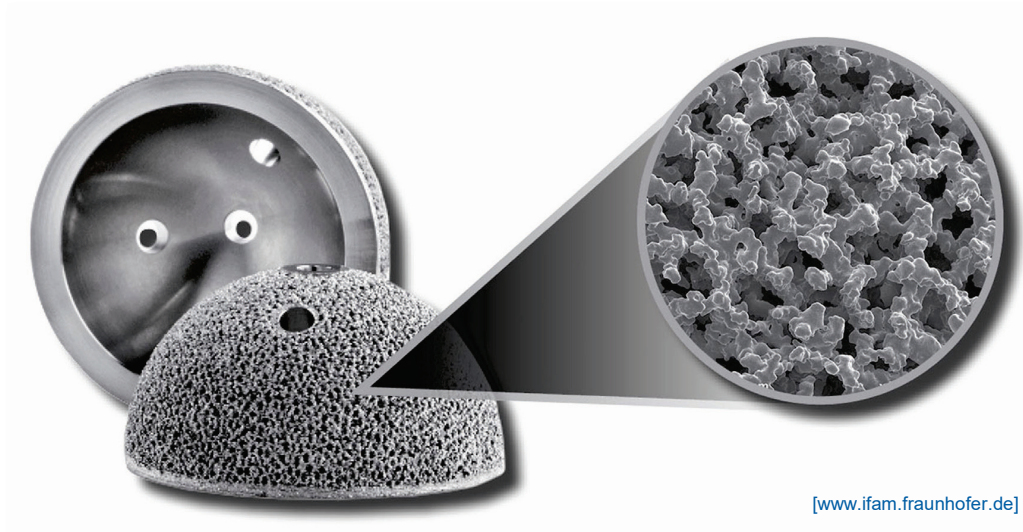
- Übergang zwischen negativen Prozessergebnissen und Bereich ohne Schmelztropfen und Schichtablösen ab $E_V = 150 \text{ J/mm}^2$
- Ab $EV = 900 \text{ J/mm}^2$ verdampft die Pulverschicht
- Strahlleistung über $PB = 400 \text{ W}$ bringt keine weiteren positiven Effekte mit sich



6 Additive Fertigungsverfahren – Powder bed fusion

EBM: BEISPIELE

Hüftgelenkpfanne mit integrierten Trabecular Structures™



Getriebegehäuse



6 Additive Fertigungsverfahren – Powder bed fusion

EBM: VOR- UND NACHTEILE

- + Verfügbarkeit einer hohen Energiedichte zum Aufschmelzen des Metallpulvers (ca. 1600°C)
- + Umgebungsbedingungen (Vakuum) führen zu hervorragenden Materialeigenschaften (homogene Materialstruktur)
- + Thermische Bedingungen bewirken hohe Formstabilität sowie eine kontrollierte thermische Balance im Bauteil
- + Vollständige Verschmelzung des Materials bis zu 100 %
- + Keine beweglichen Teile für die Steuerung des Strahls
- Oberflächenqualität vergleichbar mit Sandguss
- Nachbearbeitungsverfahren zwingend erforderlich
- Bisher relativ kleine Materialpalette kommerziell verfügbar

6 Additive Fertigungsverfahren – Powder bed fusion

EBM: ANLAGEN

Anlagentyp:	A2X
Hersteller:	GE (ehemals Arcam)
Baurate:	55 / 80 cm ³ /h
Strahlleistung:	50 - 3000 W
Bauraum:	200 mm x 200 mm x 380 mm
Scangeschwindigkeit:	8000 m/s
Anlagenabmaße:	1850 mm x 900 mm x 2200 mm



6 Additive Fertigungsverfahren – Powder bed fusion

EBM: ANLAGEN

Anlagentyp:	Spectra L/H
Hersteller:	GE
Strahlleistung:	4500/6000 W
Bauraum:	Ø350/250 mm x 430 mm
Typ. Prozesstemp.:	600 - 1100 °C
Anlagenabmaße:	2400 mm x 1400 mm x 2900 mm





Additive Fertigung

Additive Fertigung 21 – 06-03

Elektronenstrahlschmelzen

Technische Universität Bergakademie Freiberg
IMKF - Additive Fertigung
Agricolastraße 1, 09599 Freiberg, Germany

Prof. Dr.-Ing. Henning Zeidler
Tel: +49 3731 39 30 66
henning.zeidler@imkf.tu-freiberg.de



imkf
INSTITUT FÜR MASCHINENELEMENTE
KONSTRUKTION UND FERTIGUNG



TU Bergakademie Freiberg | Institut für Maschinenelemente, Konstruktion und Fertigung | Professur für Additive Fertigung
Agricolastraße 1 | 09599 Freiberg DE | Tel.: +49 3731 39 2986 | <http://www.imkf.tu-freiberg.de> | Prof. Dr.-Ing. Henning Zeidler

06-03_33