
SELEKTIVES ELEKTRONENSTRAHLSCHMELZEN (EBM) – TECHNOLOGIE UND ANWENDUNGEN

- Der EBM-Prozess
- Werkstoffe für EBM
- EBM @ Fraunhofer IFAM Dresden
- Beispielbauteil: Turboladerrad
- Fraunhofer Allianz Generativ

Der EBM-Prozess – Einführung (I)

Quelle: ORNL

Der EBM-Prozess – Einführung (II)

Quelle: Arcam AB

Der EBM-Prozess

Eigenschaften

- **EBM ist ein heißer Prozess**
- Jeder Pulverschicht wird vorgeheizt, die Temperatur ist werkstoffabhängig (z.B. Ti-6Al-4V: ca. 700°C, TiAl: > 1000°C)
 - → Verblasen des Pulvers aufgrund lokaler Ladungskonzentration wird durch leichtes Versintern der Pulverpartikel verhindert
 - → thermische Spannungen können minimiert werden
- **EBM nutzt Hochvakuum als Prozessatmosphäre**
 - zum Betrieb des Elektronenstrahls notwendig
 - → hochreaktive Werkstoffe können verarbeitet werden
 - → hilft beim Ausgasen von Verunreinigungen
 - → thermische Isolation
- **Strahlableitung durch elektromagnetische Spulen**
 - → sehr hohe Scanraten (theoretisch bis zu 8000m/s) sind möglich
 - → vergleichsweise hohe Bauraten (z.B. 80cm³/h für Ti-6Al-4V)

EBM-Maschine @ IFAM-DD

- Modell: Arcam A2X
- Strahlleistung: 50 – 3500W
- Bauraum: (200 x 200 x 380) mm³
- Multi-Beam: ja
- Pulverzufuhr: aus Vorratsbehältern über automatisches Rakelsystem
- CAD-Interface: STL
- Baukammer für Hochtemperaturwerkstoffe



EBM-SLM - der Versuch eines Vergleiches ...

Eigenschaft	EBM	SLM
Strahlquelle	Elektronenstrahl	Laser
Pulver	grob (45 – 105...150 μm)	fein (10 – 45 μm)
Atmosphäre	Vakuum	Schutzgas
Strahlableitung	Ablenkspulen	Galvanometer
Vorheizen	Elektronenstrahl	in Entwicklung (IR / Widerstandsheizung)
Scangeschwindigkeit	sehr schnell	schnell
Oberflächenqualität	sehr rau	rau
Auflösung	gut	sehr gut

Werkstoffe für EBM

generelle Anforderungen

- **EBM ist ein pulverbettbasierter Prozess**
 - → Werkstoff muss in Pulverform vorliegen
 - → Pulvereigenschaften müssen Verarbeitung erlauben
- **EBM ist ein heißer Prozess**
 - → Werkstoff muss über ausreichend Wärmeleitfähigkeit verfügen
 - → Bauteil muss einen ausreichenden Grad an Thermoschockbeständigkeit aufweisen
- **Interaktion von Pulver und Elektronenstrahl**
 - → Werkstoff muss über ausreichenden Grad an elektrischer Leitfähigkeit verfügen
- **→ bevorzugte Werkstoffe**
 - metallische Pulver

Werkstoffe für EBM

Ti-6Al-4V

■ Anwendungen



CE-certified & FDA-cleared Implants

- CE-certified acetabular cups with integrated, engineered Trabecular Structures™ since 2007
- Implants with FDA clearance since 2010
- > 40,000 cups manufactured
- > 20,000 cups implanted



Adler Ortho, IT
2007



Lima-Lto, IT
2007



Exactech, US
2010



Arcam EBM system

Aerospace Prototype



Material: Ti6Al4V
Size: Ø 180 x 300 mm
Weight: 5,5 kg
Build time: 40 hours

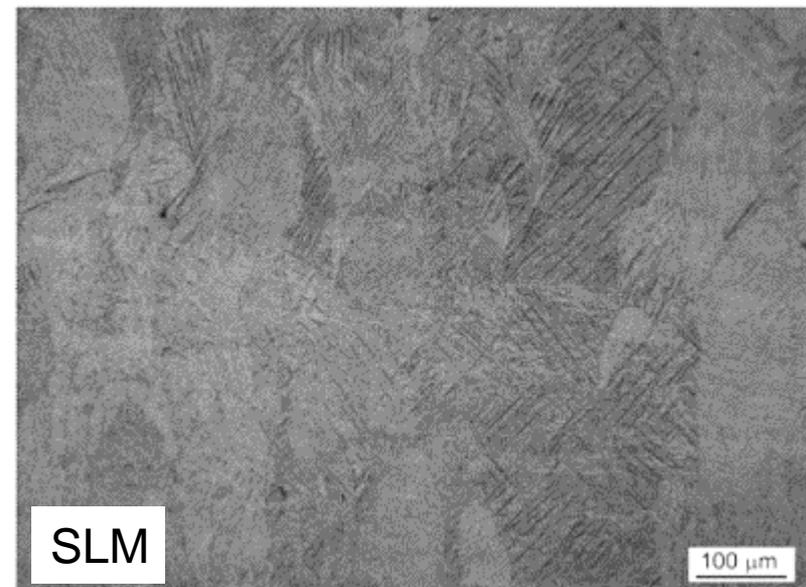
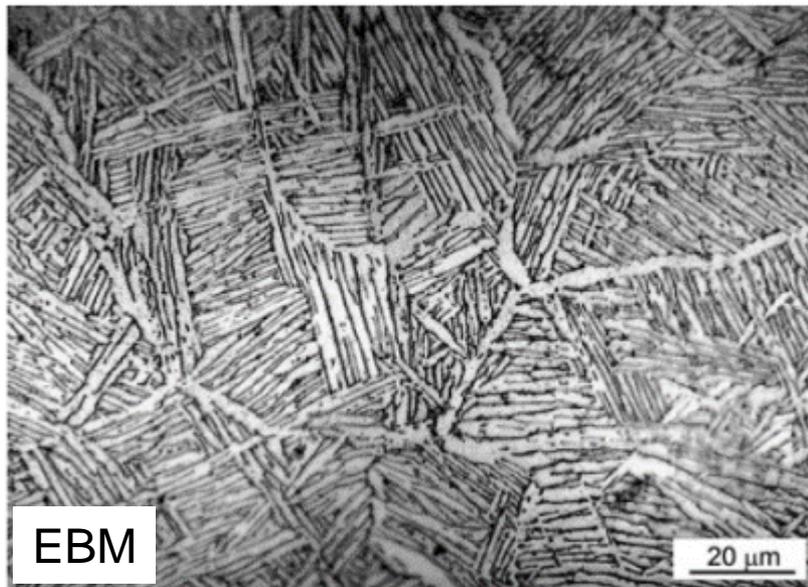


Werkstoffe für EBM

Ti-6Al-4V

■ Mikrostruktur

- EBM: $\alpha+\beta$ Mikrostruktur
- SLM: α' Martensit innerhalb größerer Kornbereiche
- → Unterschiede sind technologieabhängig (hier vor allem aufgrund der Abkühlrate, die für SLM höher ist)



Rafi et al., Journal of Materials Engineering and Performance 2013

Werkstoffe für EBM

Ti-6Al-4V

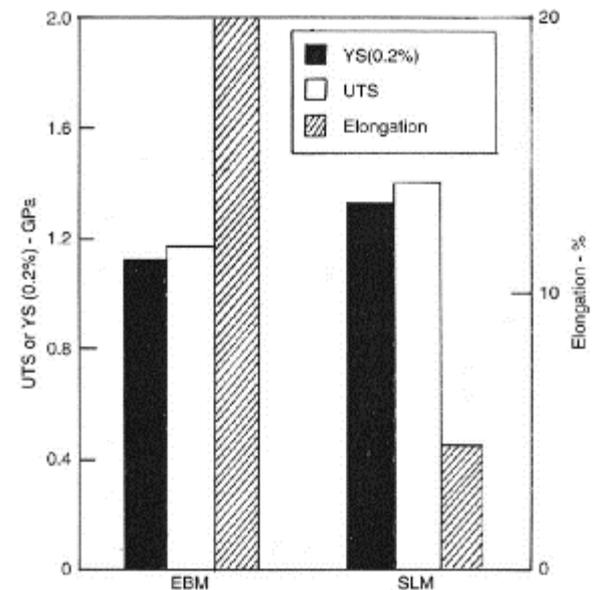
■ Mechanische Eigenschaften

- EBM – Guss-/Schmiedeteil: better and comparable, respectively
- EBM – SLM: Festigkeit niedriger, Dehnung höher aufgrund unterschiedlicher Mikrostruktur

	Arcam Ti6Al4V, Typical	Ti6Al4V, Required**	Ti6Al4V, Required***
Yield Strength (Rp 0,2)	950 MPa	758 MPa	860 MPa
Ultimate Tensile Strength (Rm)	1020 MPa	860 MPa	930 MPa
Elongation	14%	>8%	>10%
Reduction of Area	40%	>14%	>25%
Fatigue strength* @ 600 MPa	>10,000,000 cycles		
Rockwell Hardness	33 HRC		
Modulus of Elasticity	120 GPa		

*After Hot Isostatic Pressing **ASTM F1108 (cast material) ***ASTM F1472 (wrought material)

Arcam Datenblatt Ti-6Al-4V



Murr et al., Journal of Mechanical Behaviour of Biomedical Materials 2 (2009), 20

Werkstoffe für EBM TiAl

■ Anwendungen

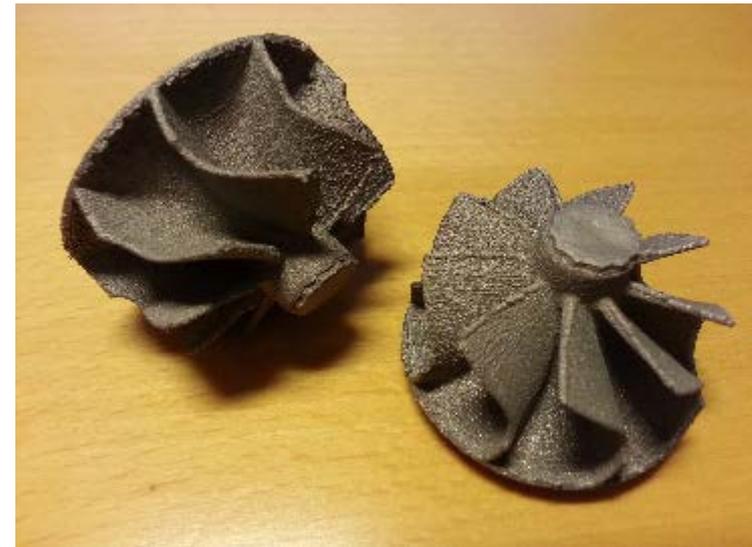


Turbine Blades



Material: γ -TiAl
Size: 8 x 12 x 325 mm
Weight: 0,5 kg
Build time: 7 hours / blade

Courtesy of Avio S.p.A.

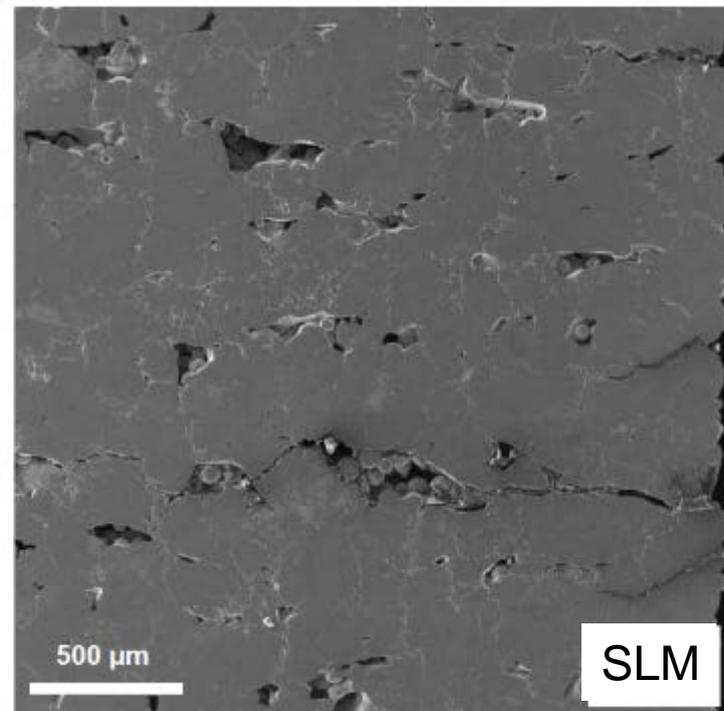
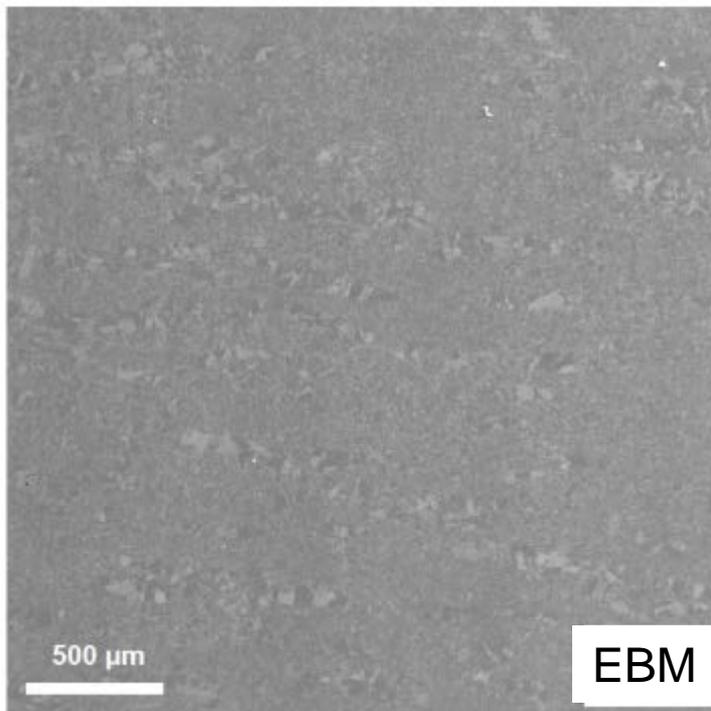


Werkstoffe für EBM

TiAl

■ Mikrostruktur (I): EBM - SLM

- EBM: dichte Probe
- SLM: sichtbare Porosität
- → dichte Bauteile derzeit bevorzugt über EBM herstellbar



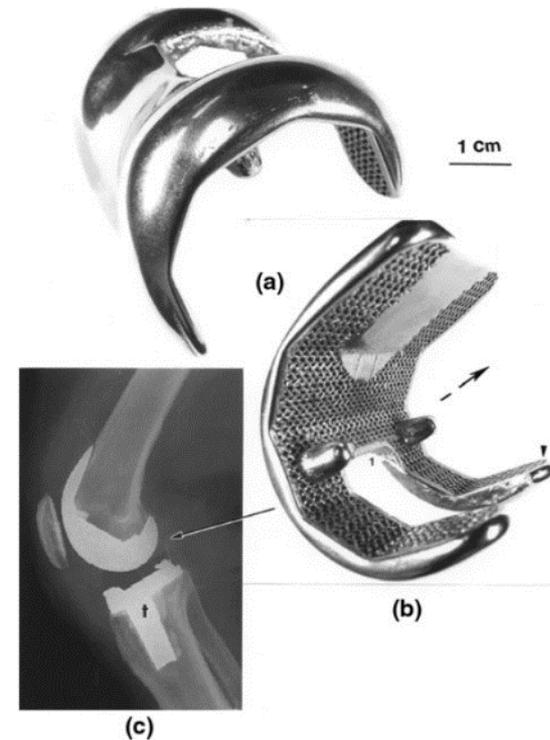
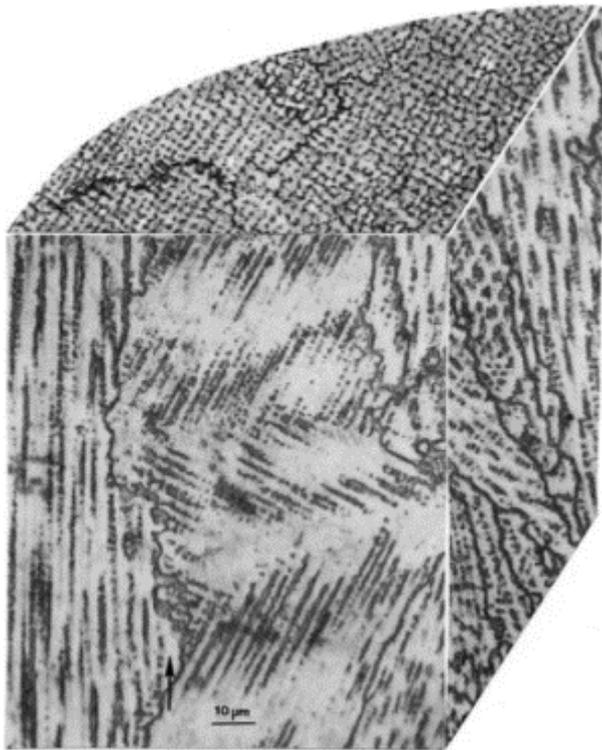
Loeber et al., SFF proceedings 2011

Werkstoffe für EBM

Co-Basis-Legierung

■ Co-Cr-Mo

- Zusammensetzung (M%): Co-29Cr-6Mo
- as-EBM-Probe zeigt säulenförmige Ausscheidungen (Cr_{23}C_6)
- prototypische Knieimplantate wurden hergestellt



Gaytan et al., Metall Mater Trans A 41 (2010), 3216



EBM @ Fraunhofer IFAM Dresden

Prozessentwicklung

■ Ziele

- Auffinden materialspezifischer Prozessfenster zur Fertigung defektfreier Bauteile
- Aufbau von Wissen über die Variation von Werkstoffeigenschaften (Mikrostruktur, Zusammensetzung, mech. Eigenschaften) innerhalb des Prozessfensters
- Kompetenzkette: vom Pulver zum Bauteil

EBM @ Fraunhofer IFAM Dresden

Prozessentwicklung

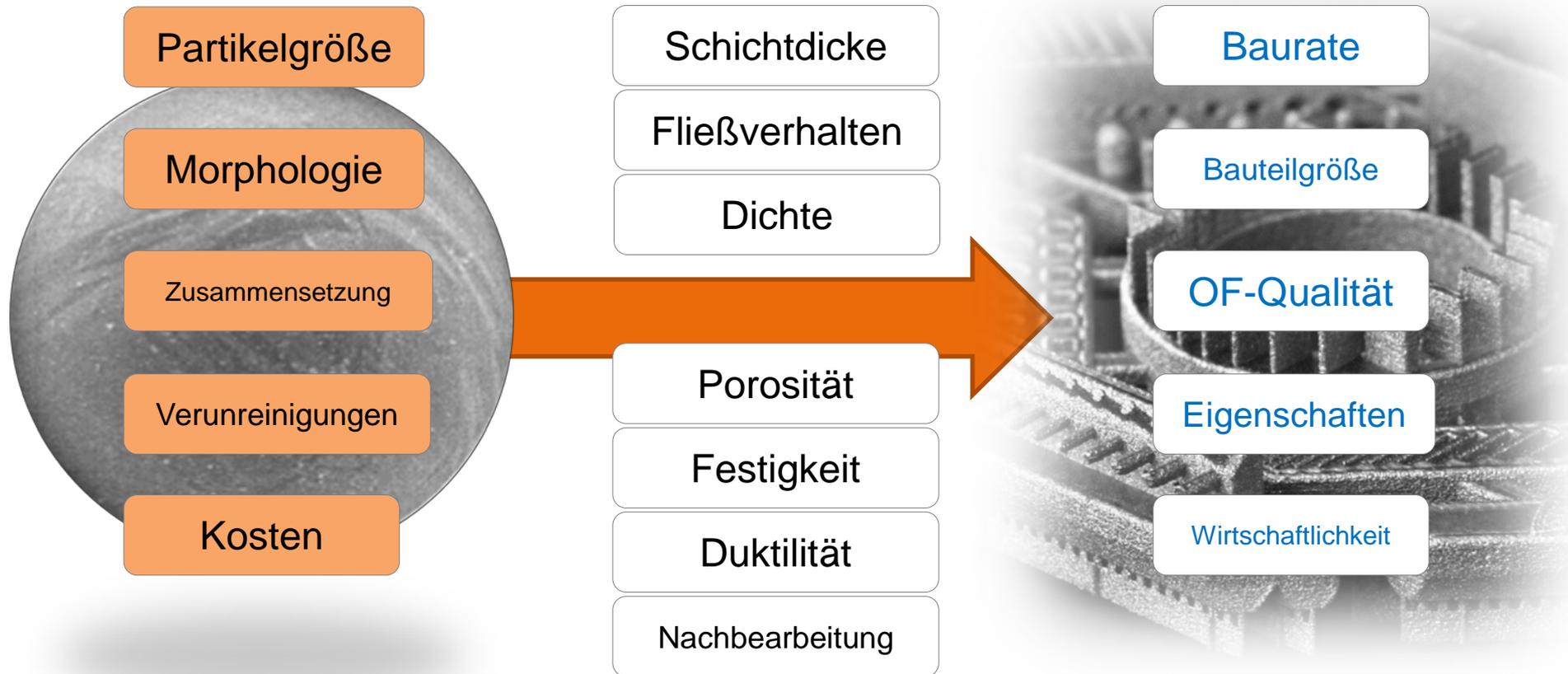


Quelle: GE Avio

■ ausgewählte Prozessschritte

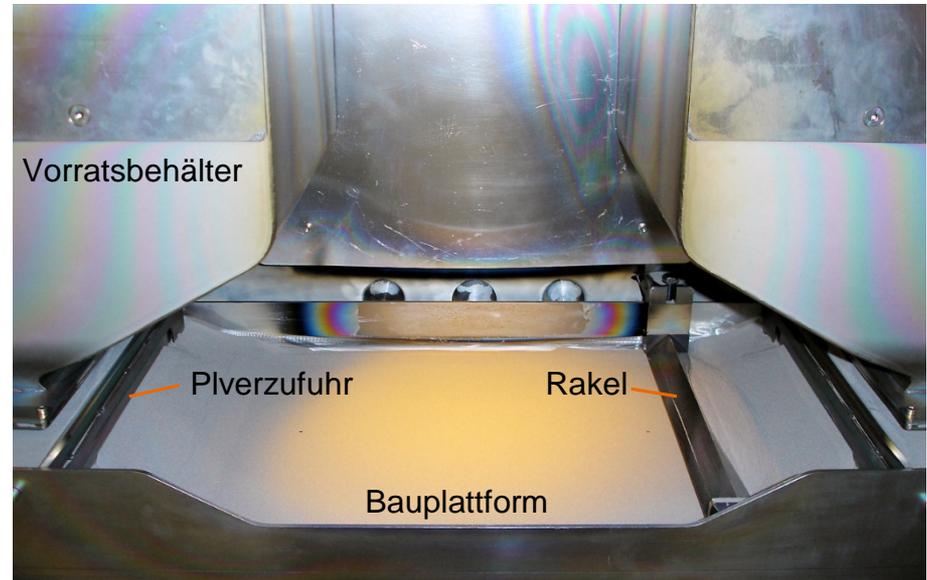
- Pulverauswahl, -spezifikation
- Bauteilherstellung:
- Parameterermittlung für die Prozessschritte:
 - Vorheizen (Startplatte und jede Pulverschicht)
 - Konturschmelzen
 - "Hatch"-Schmelzen

Bedeutung des Pulvers für Strahlschmelzverfahren



Ti-6Al-4V Pulver für selektives Elektronenstrahlschmelzen

- Fließfähigkeit
 - Pulverzufuhr und Aufrakeln
 - Hall flow 25 s
- Packungsdichte
 - Schüttdichte $> 2.5 \text{ g/cm}^3$
- Niedrige Porosität
- Reinheit
 - $\text{O}_2 < 1500 \text{ ppm}$
- Zusammensetzung
 - Elementverluste beachten
 - Al: *min. 5.75%, max. 6.75%*



- PGV 40 – 120 μm
- sphärische Partikel
→ gasverdüstertes Pulver



Fall 1: Einfluss der Partikelgrößenverteilung

- Problem bei Verarbeitung von Nicht-Standard-Pulver: “smoke” tritt wiederholt auf → Abbruch des Baujobs
- Fließfähigkeit wurde als nicht ausreichend identifiziert – Pulver hing am und auf dem Raket fest, keine homogene Pulverschicht → schlussendlich “smoke”
- Idee: Verbereitern der PGV durch Hinzunahme gröberer Fraktion → signifikante Verbesserung der Fließfähigkeit, Prozess wurde wesentlich stabiler
- Schüttdichte vergrößert

	Batch 1 (45 – 120 μm)	Batch 2 (45 – 150 μm)
Hall Flow	28 \pm 2 s	22.5 \pm 0.2 s
Schüttdichte	2.18 g/cm ³	2.23 g/cm ³



Fall 2: Wiederverwendbarkeit von Überschusspulver

- Wie verändern sich die Eigenschaften? Wie lange kann es wiederverwendet werden?
- Analysen (Ti-Basis-Pulver):
 - Verunreinigungsgehalte
 - Fließverhalten
- Resultate für dieses Pulver zeigen, dass Ausgangs- und Überschusspulver nach der u.g. Anzahl von Baujobs vergleichbar in den Eigenschaften sind → Wiederverwendung ist möglich

	Ausgang	nach 13 Baujobs
Verunreinigungen (N/O) [ppm]	170 / 1200	180 / 1400
Schüttdichte [g/cm ³]	2.59	2.56
Hall flow [s]	21.8	20.8



Prozessentwicklung

Primärparameter

$$E = P / v$$

■ Parameter

- E ... Linienenergie
- P ... Strahlleistung (= proportional zum Strahlstrom)
- v ... Scangeschwindigkeit

■ Grenzfälle

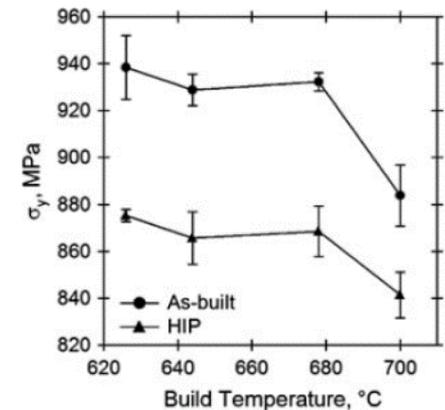
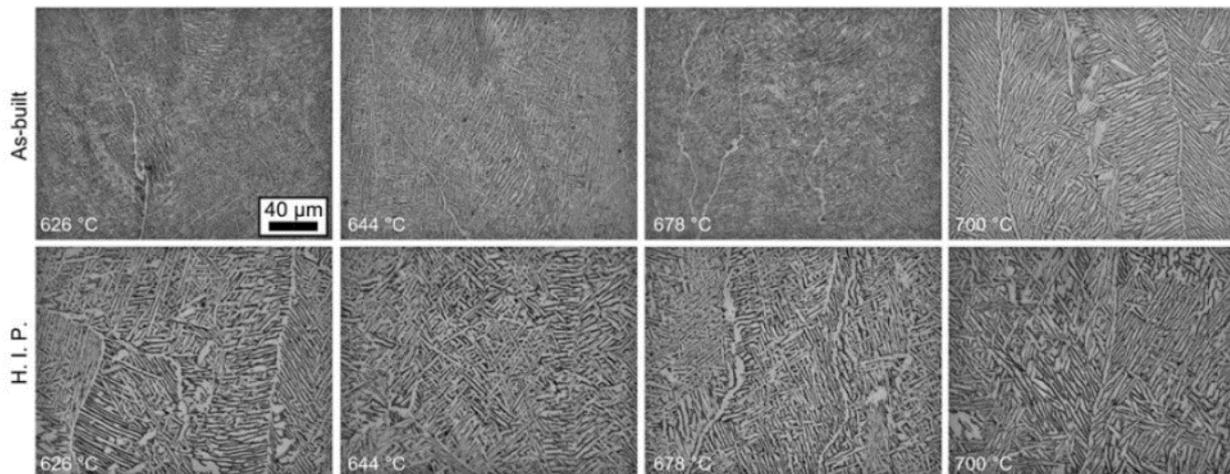
- P = const. and v sehr niedrig / v = const. and P sehr hoch → Gefahr der Abdampfung metallischer Elemente
- P = const. and v sehr hoch / v = const. and P sehr niedrig → kein vollständiges Aufschmelzen → Porosität und Baufehler

Prozessentwicklung

Einfluss Vorheizen (P, v = const.)

■ Beispiel Ti-6Al-4V

- mit steigender Vorheiztemperatur vergrößert die Mikrostruktur
- weitere Vergrößerung nach HIP-Prozess, aber nur bis zu einer Schwelltemperatur
- Einfluss auf mechanische Eigenschaften



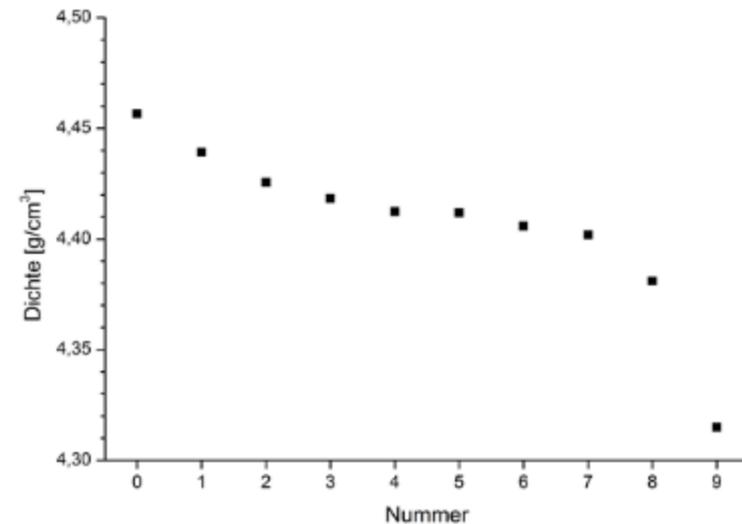
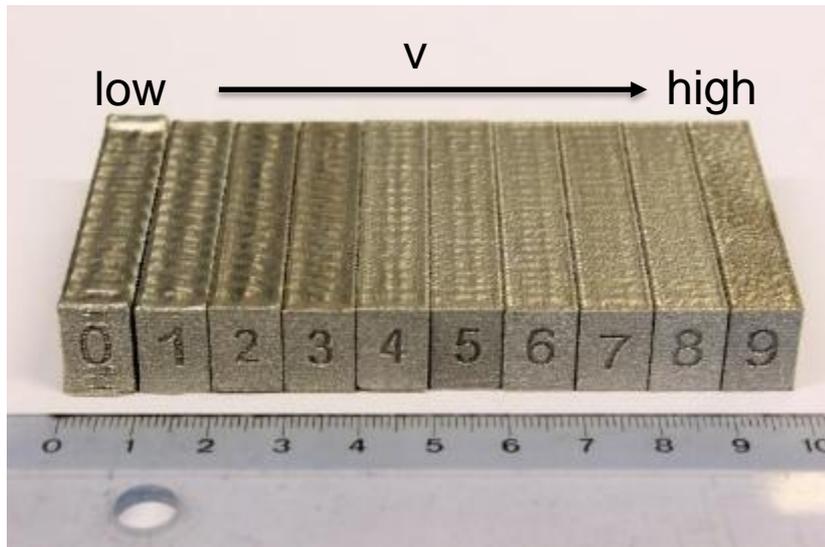
Al-Bermani et al., Metall Mater Trans A 41 (2010), 3422

Prozessentwicklung

Einfluss Scangeschwindigkeit ($P = \text{const.}$)

■ Ti-6Al-4V

- $v = \text{niedrig}$
 - wellige Oberfläche, Aufwölbungen \rightarrow too much powder is molten
 - Dichte $> 100\%$ \rightarrow mögliche Abdampfung von Al
- $v = \text{hoch}$
 - raue Oberfläche
 - Dichte $< 100\%$ \rightarrow Porosität



Prozessentwicklung

Einfluss Scangeschwindigkeit ($P = \text{const.}$)

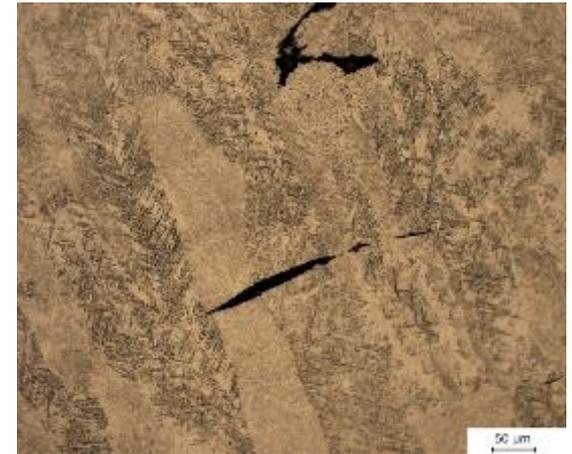
- Ti-6Al-4V
 - $v = \text{niedrig} \rightarrow \text{mittel}$: Kornfeinung
 - $v = \text{niedrig/mittel} \rightarrow \text{hoch}$: Porosität, Martensit



niedrig



mittel



hoch

Scangeschwindigkeit



Prozessentwicklung

Parameterfeld

- **Ti-6Al-4V**
 - Auftragung Scangeschwindigkeit über Strahlstrom
 - materialabhängig
 - gute Qualität (= dicht, defektfrei): minimale Linienenergie notwendig, aber auch obere Grenze

Demonstrator: EBM-TiAl Bauteil für Turbolader

Werkstoff und Versuche

■ Legierung und Pulver

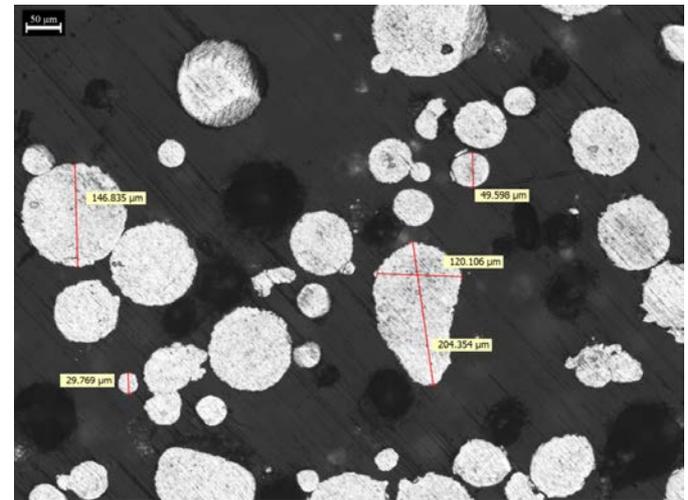
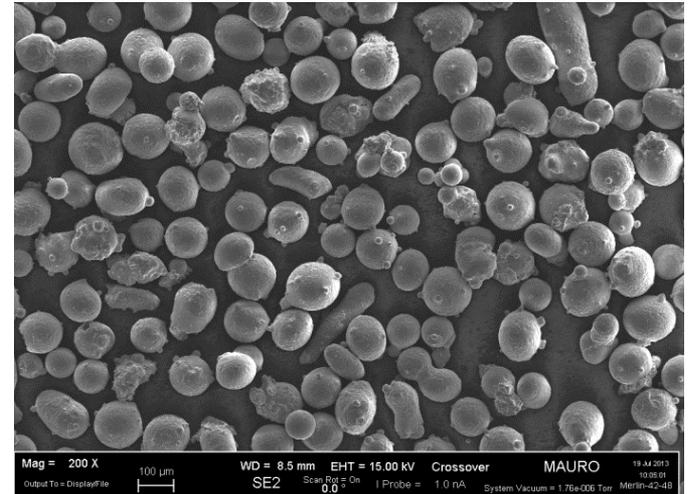
- Zusammensetzung: Ti-48Al-2Cr-2Nb ("48-2-2" Legierung von GE)
- gasverdüstertes Pulver
- Partikelgröße: 45 – 150µm

■ Verarbeitung

- Schichtdicke EBM: 70µm
- Wärmebehandlung nach EBM zur gezielten Einstellung der Mikrostruktur

■ Analyse

- Zusammensetzung Pulver und Bauteil (ICP, LECO)
- Mikrostruktur in verschiedenen Prozessstadien



Zusammensetzung Pulver und Bauteil

	Al [M%]	Cr [M%]	Nb [M%]	Fe [M%]	O [M%]	N [M%]	C [M%]	S [M%]	Ti [M%]
48-2-2 Pulver	34.1	2.37	4.78	0.03	0.084	0.004	0.006	<0.001	Bal.
TL-Rad	32.7	2.30	4.86	0.05	0.079	0.006	0.014	<0.001	Bal.

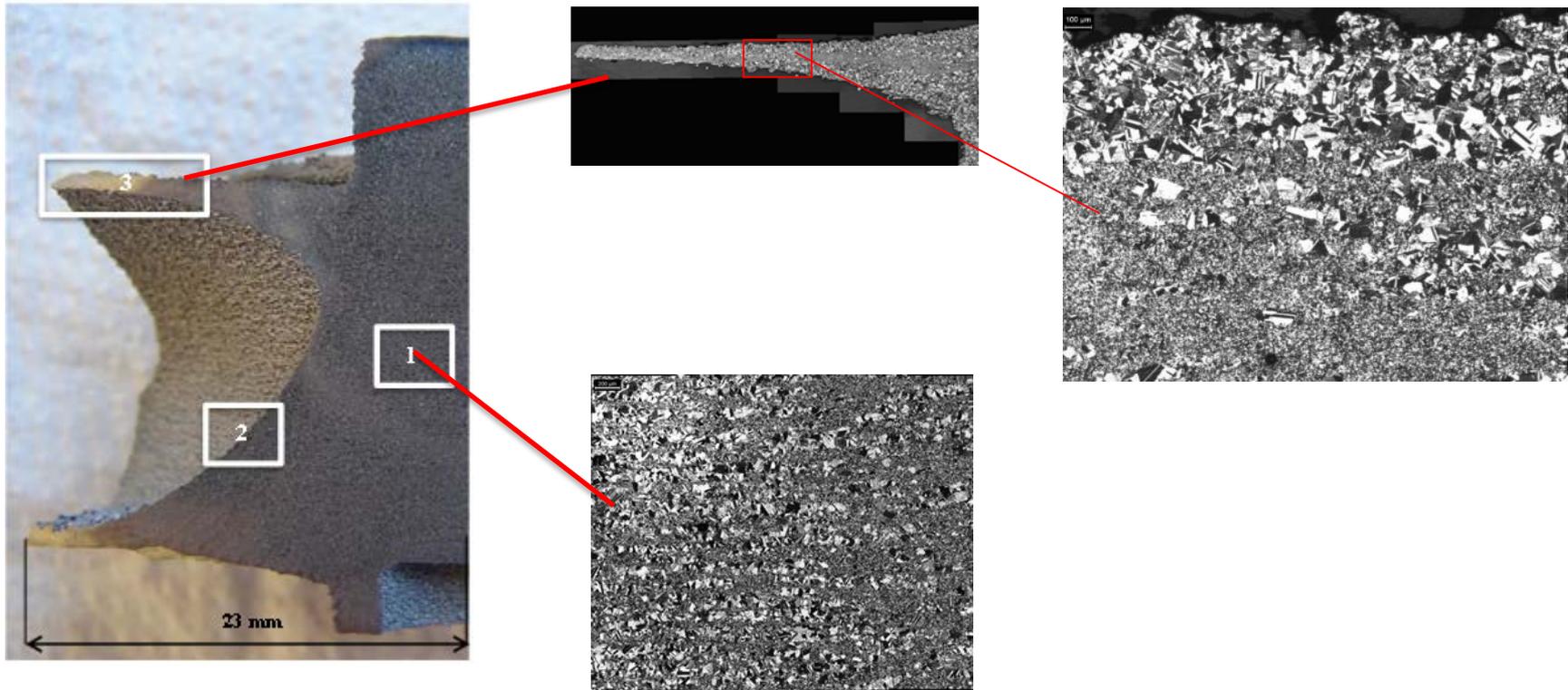
■ Experimentelles

- Al, Cr, Nb, Fe → ICP
- C, N, O, S → LECO

■ results

- Verunreinigungen: vergleichbare Gehalte in Pulver und Bauteil
- hauptsächlichster Unterschied ist Al-Gehalt → Verlust von ca. 1.4 M% mit den verwendeten Prozessparametern

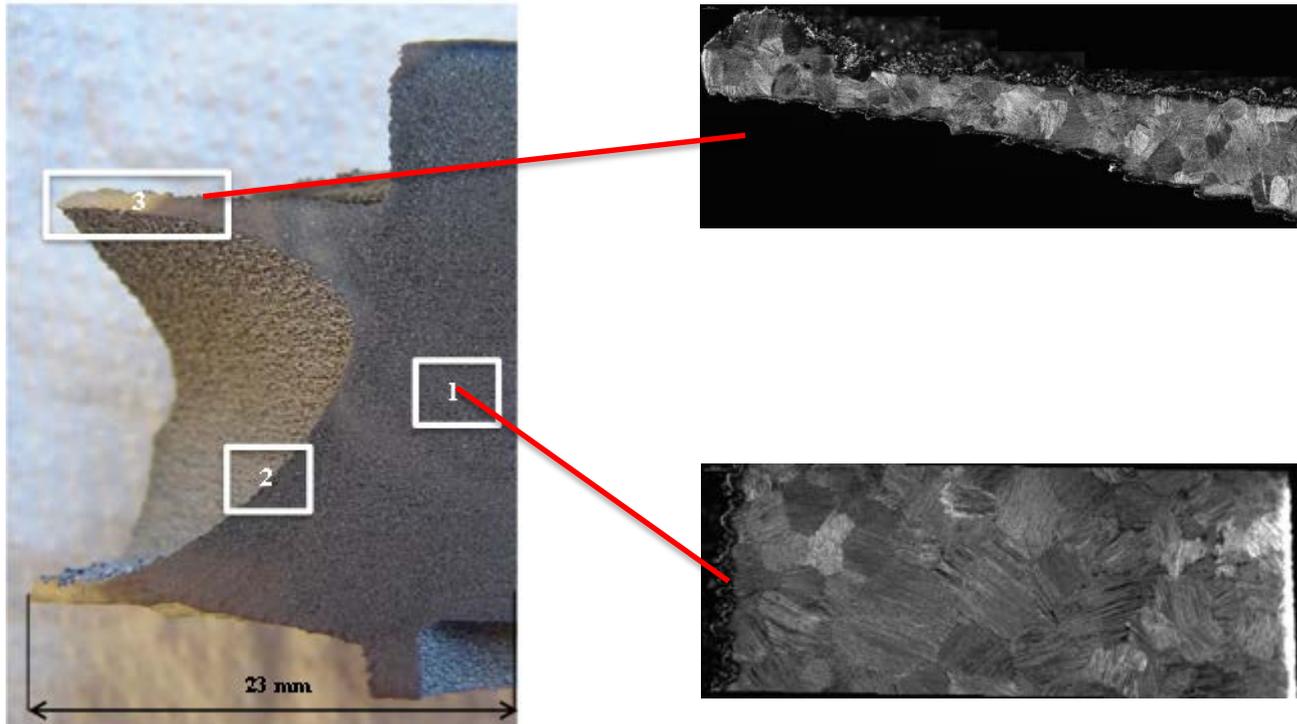
Mikrostruktur Turboladerrad



■ Zustand “as EBM”

- innen (1): “near gamma”, bimodale Korngrößenverteilung
- Schaufel, äußere Region (3): “near gamma” mit Grobkorn an Außenseite

Mikrostruktur Truboladerrad (II)



- Zustand wärmebehandelt (1320°C, 2h)
 - innen (1) und Schaufel, äußere Region (3): “fully lamellar”
 - das ist die Zielstruktur für die Anwendung

Zusammenfassung

■ Warum EBM?

- Sehr gutes Anwendungspotential für hochschmelzende und/oder hochreaktive Werkstoffe (z.B. intermetallisch (TiAl, ...), Superlegierungen (IN718, ...))
- vergleichsweise hohe Bauraten (die zukünftig weiter erhöht werden)
- ausgewählte Werkstoffe (e.g. TiAl) können derzeit bevorzugt mittels EBM verarbeitet werden

■ Werkstoffe für EBM

- Derzeit: Ti, Ti-6Al-4V, TiAl, CoCr
- zukünftig: Ni-Basis, Refraktärmetalle

■ Ziele der Prozessentwicklung

- Nutzung von Pulver, das für EBM geeignet ist
- Auffinden geeigneter Parameter für jeden Prozessschritt
- Auffinden des werkstoffspezifischen Parameterfeldes

Fraunhofer-Allianzen

Ziel, Tätigkeit

- Mittel-/Langfristplattform
- Initiierung und Vertretung von Kompetenzfeldern der Fraunhofer-Gesellschaft im Außenraum
- Strategische Marktanalysen/Studien
- Gemeinsame Akquise, Vermarktung von Ergebnissen/Diensten, Messebeteiligung, PR-Aktionen, Anfrage-/Angebotsmanagement
- Beeinflussung und (ggf.) Initiierung von FuE-Programmen
- ggf. gemeinsame Vorlaufforschung

Mitglieder

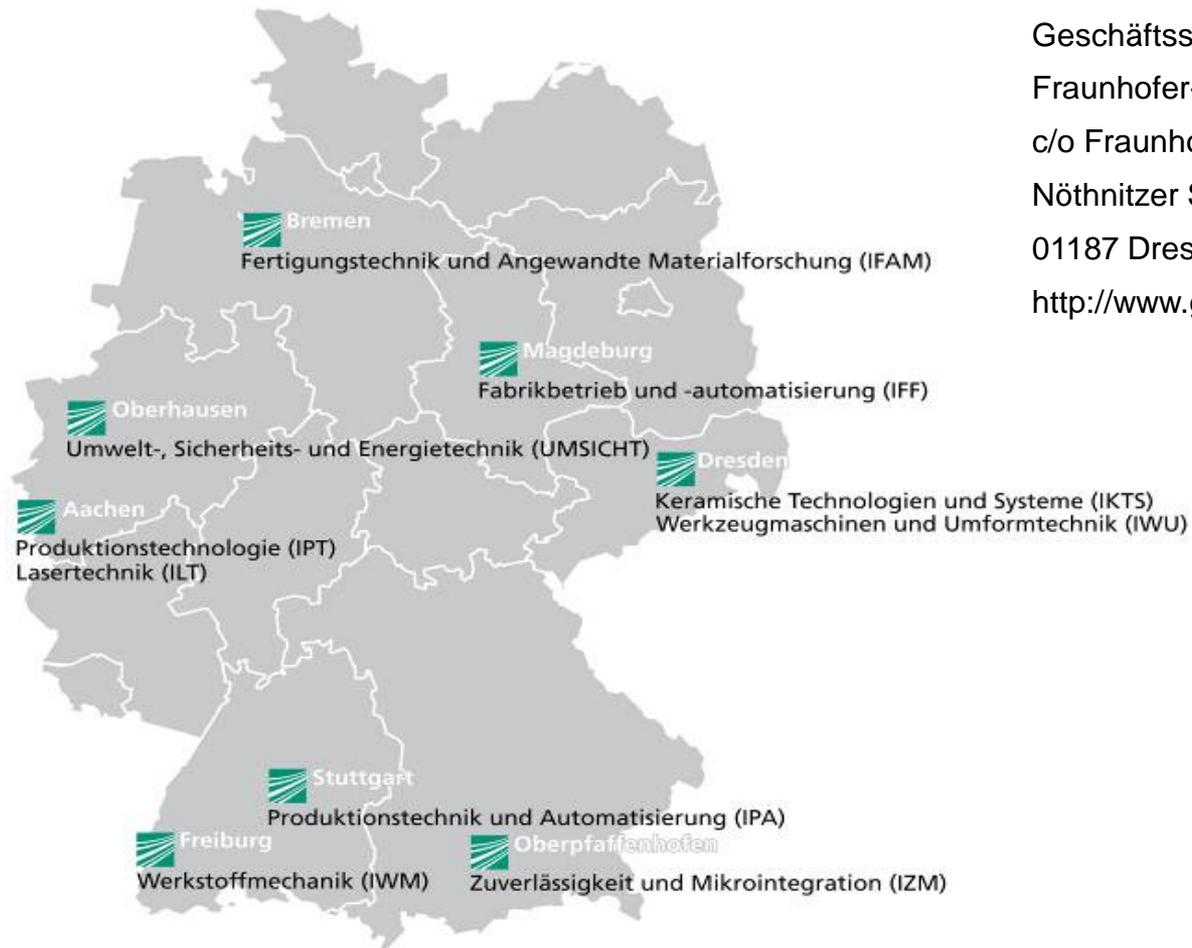
- Institut (ggf. Teilinstitut) als Mitglied
- Vertretung durch Institutsleiter/Abteilungsleiter

Errichtung/Beendigung

- Selbstorganisation der Mitglieder, offene themenbezogene Mitgliedschaft
- Bestätigung durch den Vorstand
- Aufhebung des Labels bei Nichterfüllung der Kriterien durch den Vorstand möglich

Fraunhofer-Allianz Generative Fertigung

Mitgliedsinstitute



Geschäftsstelle:

Fraunhofer-Allianz Generative Fertigung

c/o Fraunhofer IWU

Nöthnitzer Str. 44

01187 Dresden

<http://www.generativ.fraunhofer.de/>

Fraunhofer-Allianz Generative Fertigung

Entwicklungsschwerpunkte

■ Produkte

Neue Produkte finden und konstruieren



■ Werkstoffe

Neue Werkstoffe anpassen



■ Technologien

Effiziente Technologien verfügbar machen



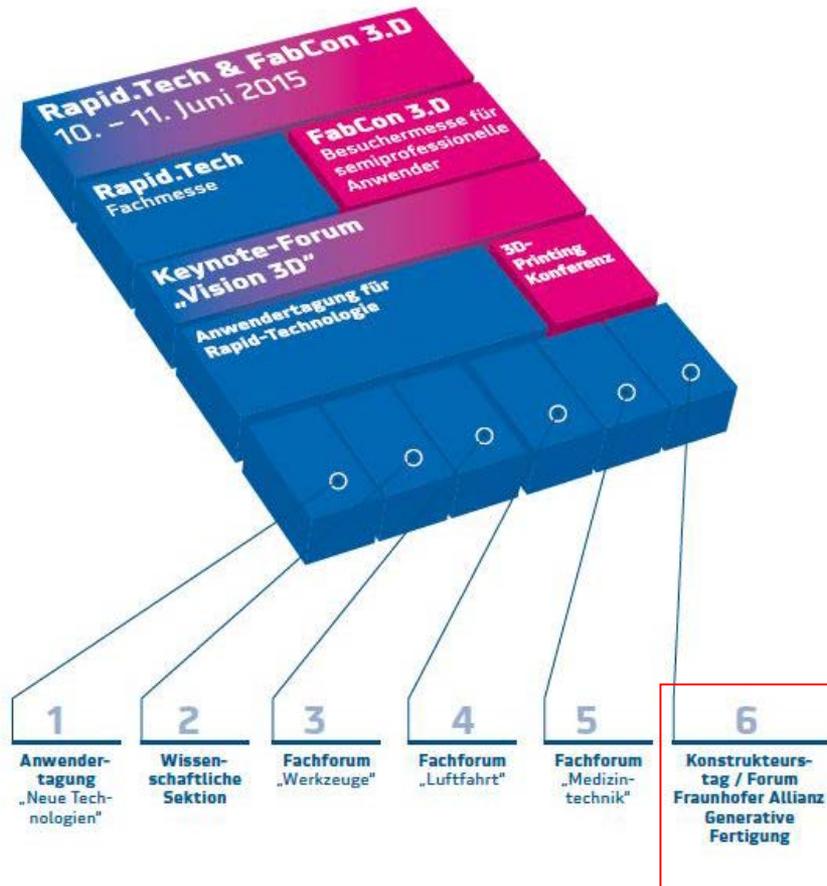
■ Qualität

Reproduzierbare Fertigungsqualität sichern



Fraunhofer-Allianz Generative Fertigung

“Save the Dates!”



Fraunhofer-Allianz Generative Fertigung “Save the Dates!”

Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference DDMC 2016
Berlin, March 16 - 17, 2016



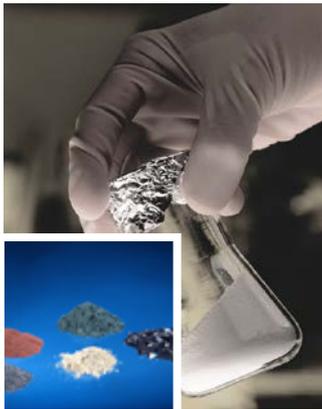
Range of topics:

- Product Development, incl.
 - simulation
 - co-design
 - mass customization
- Technologies, incl.
 - bio-printing
 - hybrid processes
 - novel developments/visionary concepts
- Material, incl.
 - ceramics
 - bio-materials
 - multi-material approaches
- Quality, incl.
 - process/part quality management

Submissions on innovative and visionary approaches not fitting the range of topics above are also welcome
→ **Call for Papers closes June 15, 2015!**

Profil Fraunhofer IFAM

- Kompetenzfeld
- **Selektives Elektronenstrahlschmelzen**



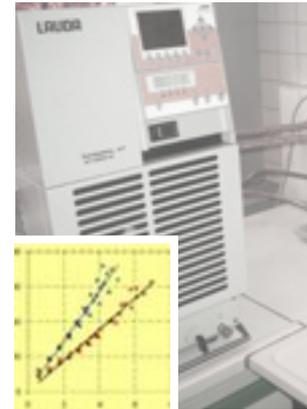
Pulvercharakterisierung
und -modifikation



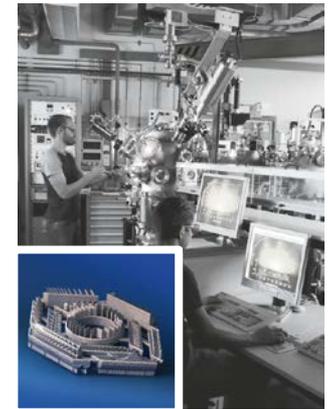
Vorbereitung



Generative Fertigung
(EBM)



Charakterisierung



Prototypen /
Kleinserien