

Topologieoptimierung und Funktionsintegration - Chancen für die Additive Fertigung

Univ.-Prof. Dr. Franz Haas, Dipl.-Ing. Raphael Tiefnig

13. April 2023



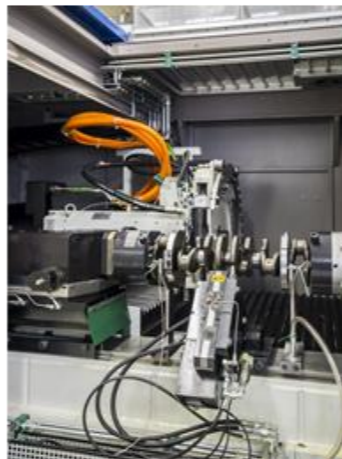
Institute of Production Engineering

Precision
Machining

Fluid
Technology

Additive
Manufacturing

Smart
Factory



Agenda

- **Einleitung**
- Additive Fertigung am IFT
- Additive vs. konventionelle Fertigung
- Topologieoptimierung
- Funktionsintegration
- Design für LPBF-Prozess
- Fazit und Ausblick

IFT – Institut für Fertigungstechnik

- Personal: 30 Mitarbeiter (2022)
- Drittmittelprojekte 2021
 - Umsatz: € 800.000
- Labore, Büros: 1.775 m²
 - Stammsitz Kopernikusgasse 24
 - Smart Factory Inffeldgasse 25f
- Lehrveranstaltungen
 - Mechanische Technologie
 - Smart Factory
 - Robotik, Fluidtechnik, ...
- Investitionen 2016 - 2022: € 3.000.000



Agenda

- Einleitung
- **Additive Fertigung am IFT**
- Additive vs. konventionelle Fertigung
- Topologieoptimierung
- Funktionsintegration
- Design für LPBF-Prozess
- Fazit und Ausblick

Additive Fertigung am IFT

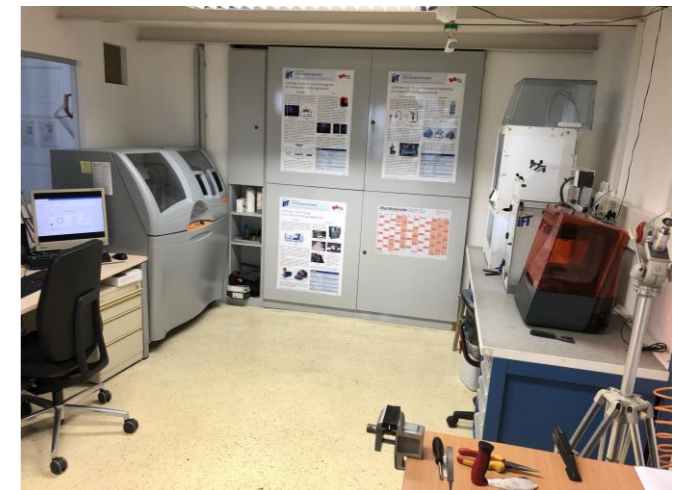


AddLab@tugraz

WRaP – Workplace for Rapid Production

Zentrum für **additive Polymer-Fertigung** am IFT

- Inbetriebnahme: Dezember 2020
- Derzeitiges Maschinenportfolio:
 - FFF:
 - Ultimaker S5 Bundle
 - Ultimaker 2+ Extended
 - SLA:
 - Formlabs Form 3
 - Form Wash & Form Cure
 - 3D-Printing:
 - Z-Printer 450
- Betriebstätigkeiten:
 - Forschung und Lehre
 - Interne und externe Abwicklung von Aufträgen



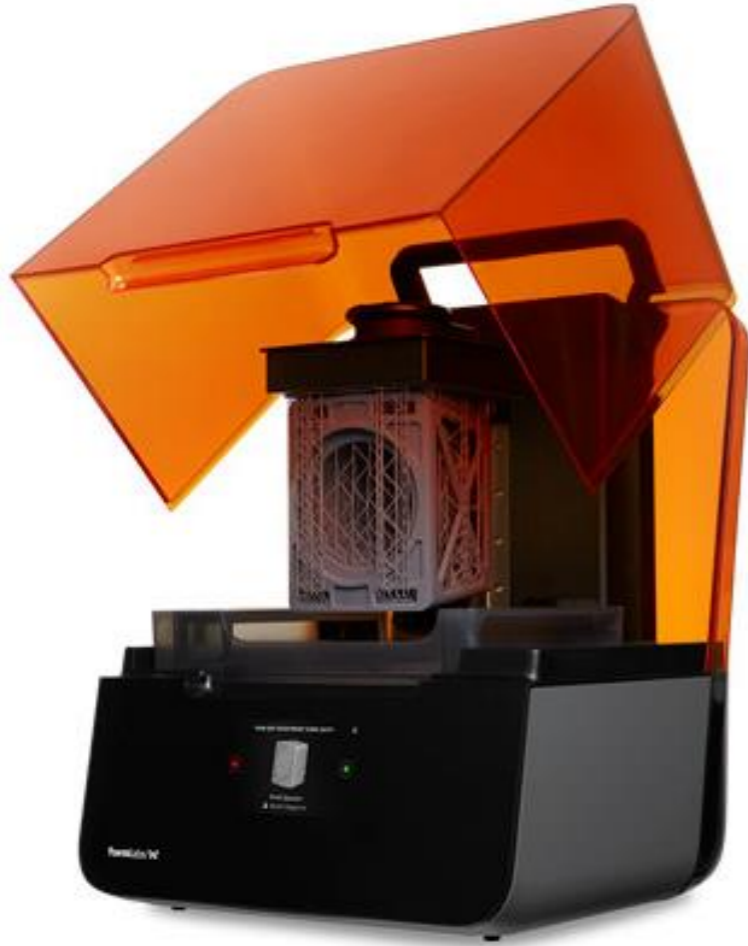
Fused Filament Fabrication



Datenblatt: Ultimaker S5 Bundle

Bauraum	330 x 240 x 300 mm
Schichtdicken	0,02 - 0,2 mm
Baugeschwindigkeit	< 24 mm ³ /s
Genauigkeit / Auflösung	6,9 µm (x/y) / 2,5µm (z)
Aufheizdauer	< 4 min
Leistung	500 W
Extruder	Dual
Gewicht	20,6 kg
Materialien	PLA, CFF PETG, ABS, CPE, PC, PP, PVA, TPU
Temperatur Druckbett	20 – 140 °C
Maximale Düsen-Temperatur	250°C

Stereolithografie (SLA)



Datenblatt: Formlabs Form3

Bauraum	145 x 145 x 185 mm
Schichtdicken	0,025 – 0,3 mm
Baugeschwindigkeit	< 42 mm ³ /s
Genauigkeit / Auflösung	25 µm (x/y) 25 µm (z)
Laser	1
Laserleistung	250 mW
Laserspotgröße	0,085 mm
Gewicht	17,5 kg
Materialien	Grey, Rigid, Tough, Transparent, Elastic
Temperatur intern	35 °C
Betriebsumgebung	18 – 28 °C

3D-Printing



Datenblatt: ZCorporation Z-Printer450

Bauraum	254 x 203 x 203 mm
Schichtdicken	0,089 - 0,102 mm
Baugeschwindigkeit	2-4 Schichten/min bzw. $\sim 6,95 \text{ mm}^3/\text{s}$
Genauigkeit / Auflösung	300 x 450 dpi (dots per inch) +/- 0,15 mm
Druckköpfe	2
Farben	180 000
Gewicht	193 kg
Materialien	Hochleistungs-Polymer-Komposit
Temperatur	20-22 °C (Raumtemperatur)

AddLab – Additive Manufacturing Lab

- Kooperation zwischen IMAT (Institute of Materials Science, Joining and Forming) und IFT (Institut für Fertigungstechnik)
- Fokus auf metall-additive Fertigung
- Derzeitiges Maschinenportfolio:
 - SLM
 - SLM 280HL (IFT)
 - Coherent CREATOR RA (IMAT)
- Betriebstätigkeiten:
 - Forschung & Lehre
 - Design für AM (Topologieoptimierung)
 - Abwicklung von internen und externen Projekten



SLM 280HL



Datenblatt: SLM 280 HL (SLM Solutions)

Bauraum	280 x 280 x 365 mm
Schichtdicke	20 - 90 µm
Scangeschwindigkeit	10 m/s
Laserleistung	400 W
Minimale Spotgröße	80 µm
Gewicht	1300 kg
Werkstoffe	Aluminiumlegierungen, Edelstahl, Titanlegierungen
Bauplattentemperatur	max. 200°C

Coherent CREATOR RA

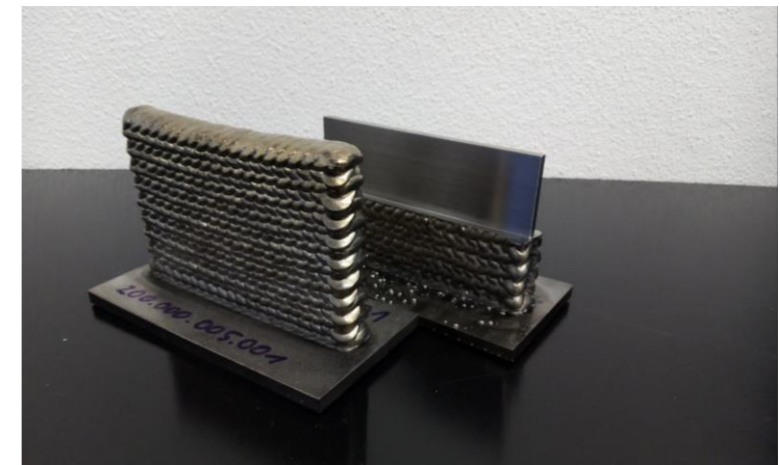


Datenblatt: Coherent Creator RA

Bauraum (ØxH)	100 x 110 mm
Schichtdicke	20 - 100 µm
Scangeschwindigkeit	6 - 20 m/s
Laserleistung	250 W
Min. Spotgröße	40 µm
Gewicht	400 kg
Werkstoffe	Titanlegierungen, Aluminumlegierungen, Nicht-reaktive Werkstoffe

WAAM Anlage – Gefertec arc 605

- Schenkung der AMAG an die TU Graz
- Draht-basierte additive Fertigung von massiven Bauteilen
- Optionale Frässpindel ermöglicht Fertigbearbeitung der Bauteile
- 5-Achs-Fräsbearbeitung
- Fertigung von Bauteilen mit bis zu 0,8 m³ bzw. Maximalgewicht von 500 kg



Gefertec arc 605



Datenblatt: Gefertec arc605

Max. Bauteilabmessungen	Ø 0,9 m x 1,1 m → 0,8 m ³
Äußere Maschinenabmessungen	4,5 x 4,5 x 4,5 m
Verfahrwege (x – y – z)	1100 – 1400 – 1720 mm
Verfahrgeschwindigkeit	25 m/min
Max. Tischlast	420 kg
Gewicht	16 000 kg (inkl. max. Bauteilgewicht)
Kühlleistung	4 kW

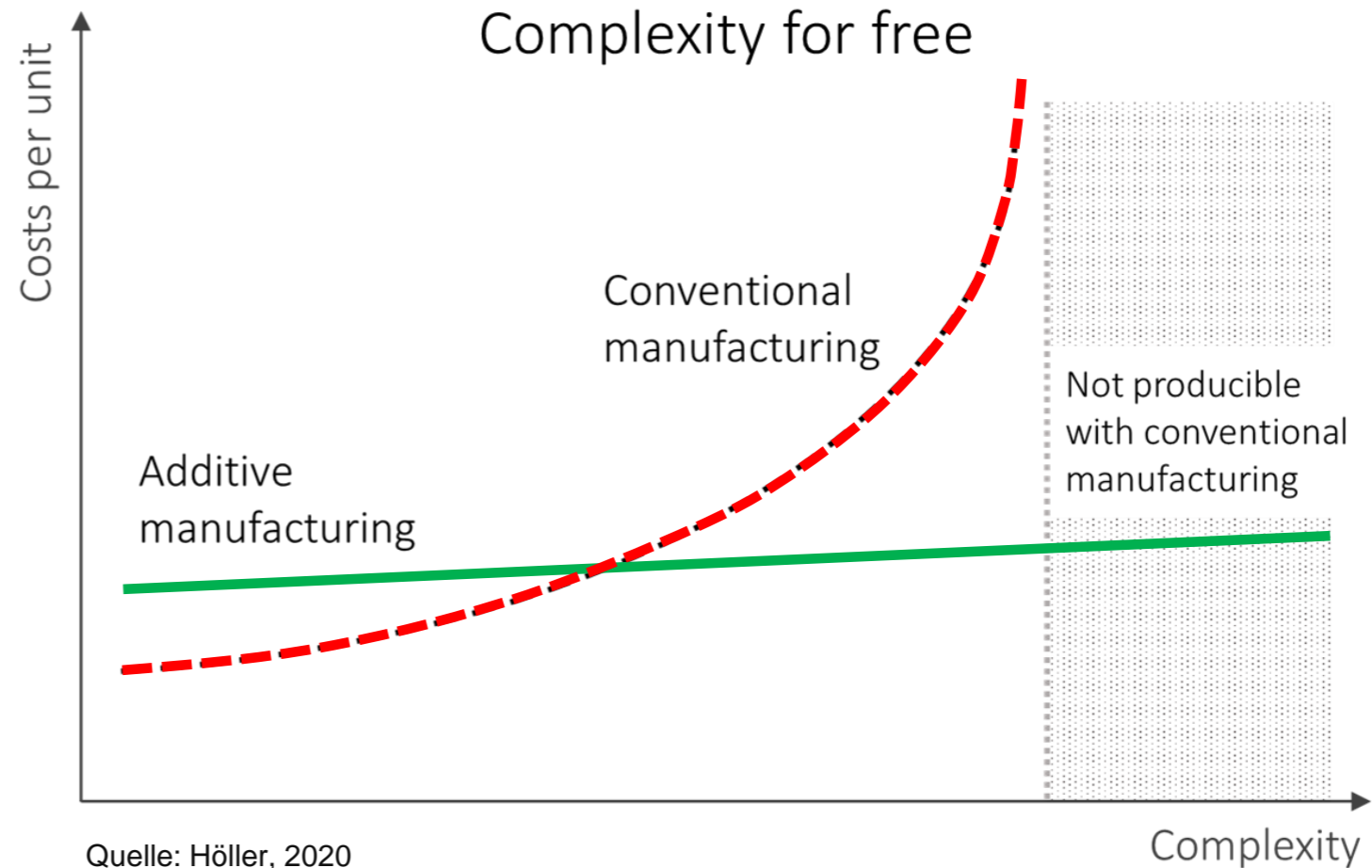
Agenda

- Einleitung
- Additive Fertigung am IFT
- **Additive vs. Konventionelle Fertigung**
- Topologieoptimierung
- Funktionsintegration
- Design für LPBF-Prozess
- Fazit und Ausblick

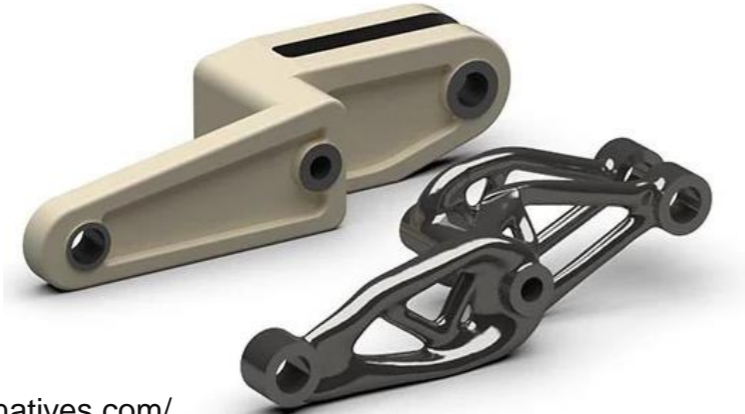
Additive Fertigung vs. Konventionelle Fertigung

Möglichkeiten von AM:

- Komplexe Strukturen
- Hoher Individualisierungsgrad
- Leichtbau
- Optimale Werkstoffausnutzung
- Flexibilität



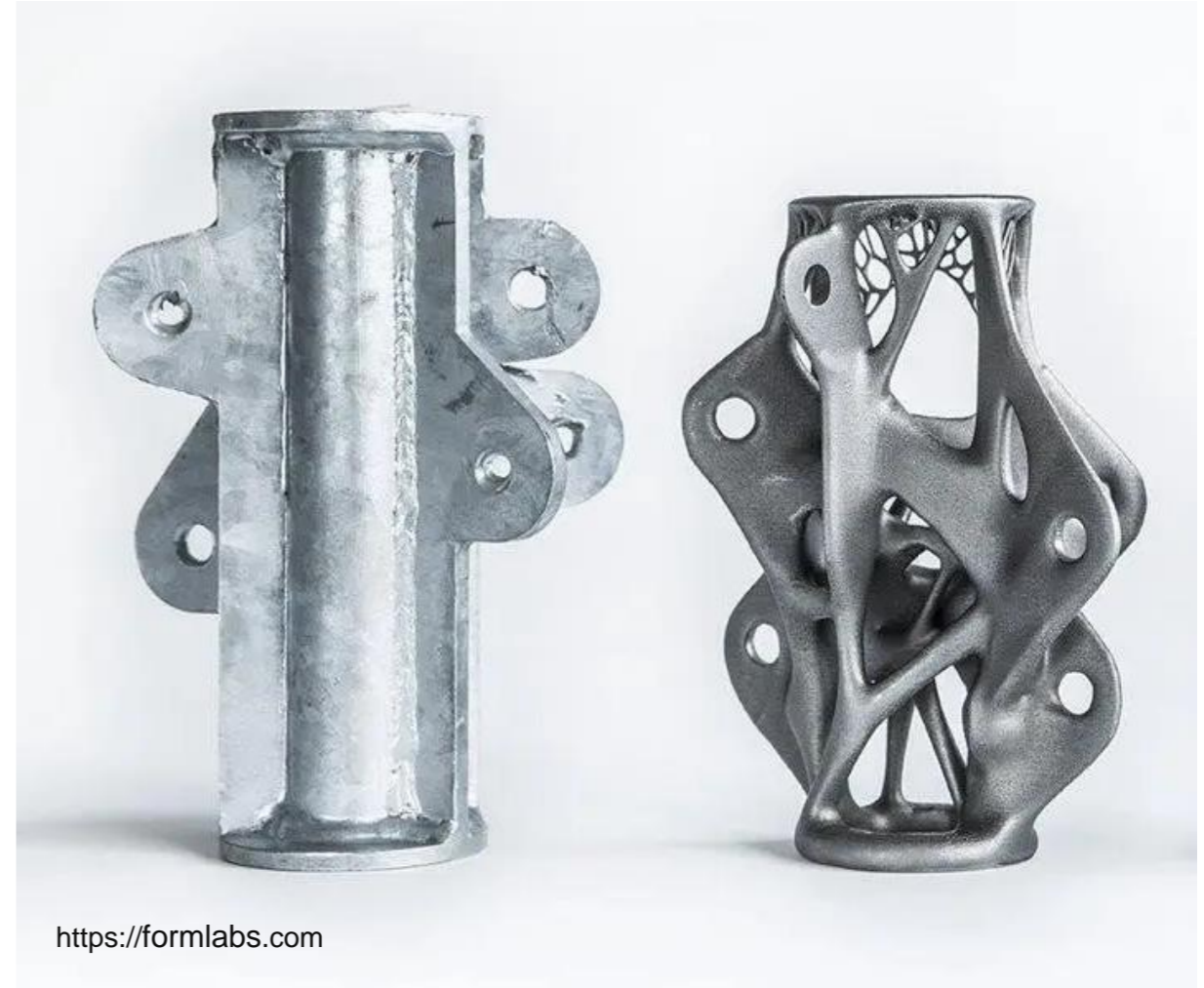
Additive Fertigung vs. Konventionelle Fertigung



<https://www.3dnatives.com/>



<https://www.3dnatives.com>



<https://formlabs.com>

Additive Fertigung vs. Konventionelle Fertigung

Additive Fertigung:

- + Fertigung komplexer Geometrien
- + Sehr hohe Flexibilität
- + Hoher Individualisierungsgrad
- + Topologie-Optimierung

- Längere Bauzeit
- Geringe Fertigungsgenauigkeit
- Post-Processing erforderlich

Konventionelle Fertigung:

- + Materialeigenschaften unbeeinflusst
- + Hohe Fertigungsgenauigkeiten
- + Nutzung von Skaleneffekten

- Geometrieinschränkungen
- Werkzeugkosten
- Werkstoffausnutzung

A 3D printed lattice structure, likely a mechanical part, shown in a light gray color. The structure is composed of interconnected rectangular and circular elements, forming a porous, grid-like pattern. It has a complex, curved shape with several circular openings and a central protrusion.

DfAM – Design for Additive Manufacturing

„Vom fertigungsorientierten zum funktionsorientierten Design“

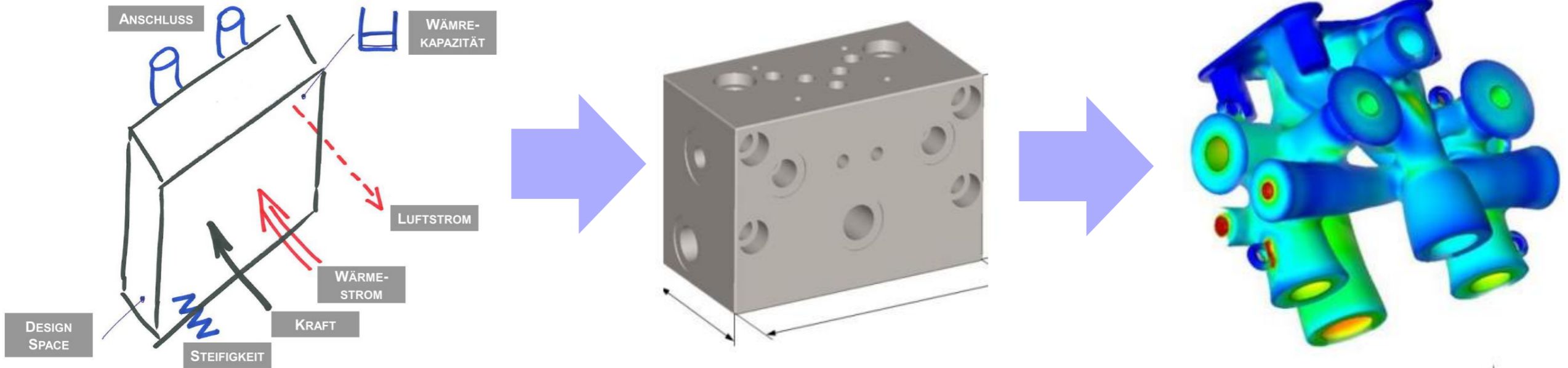
Design für Additive Fertigung

„**DfAM** beschreibt methodische Werkzeuge und Ansätze, die die volle Gestaltungsfreiheit der Additive Manufacturing Technologien nutzen. Der Fokus liegt dabei auf dem Denken in **Funktionen** oder dem **funktionsorientierten Design**.“

- Mehrwert durch Nutzung der Additiven Fertigung
- Bruch mit Denkmustern der traditionellen Fertigung – Verankerung des “Additiven Denkens”
- Von produktionsorientiertem zu funktionsorientiertem Design
- CAD-Software muss funktionsorientierten Ansatz ermöglichen.

Funktionsorientiertes Design

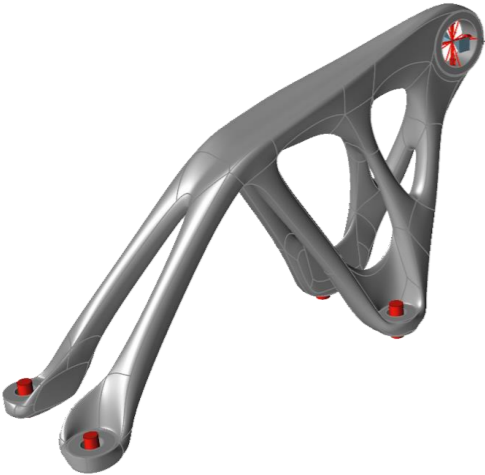
Die Möglichkeiten der Additiven Fertigung müssen ausgeschöpft werden.



(Quelle: Laser Zentrum Nord)

Design für Additive Fertigung

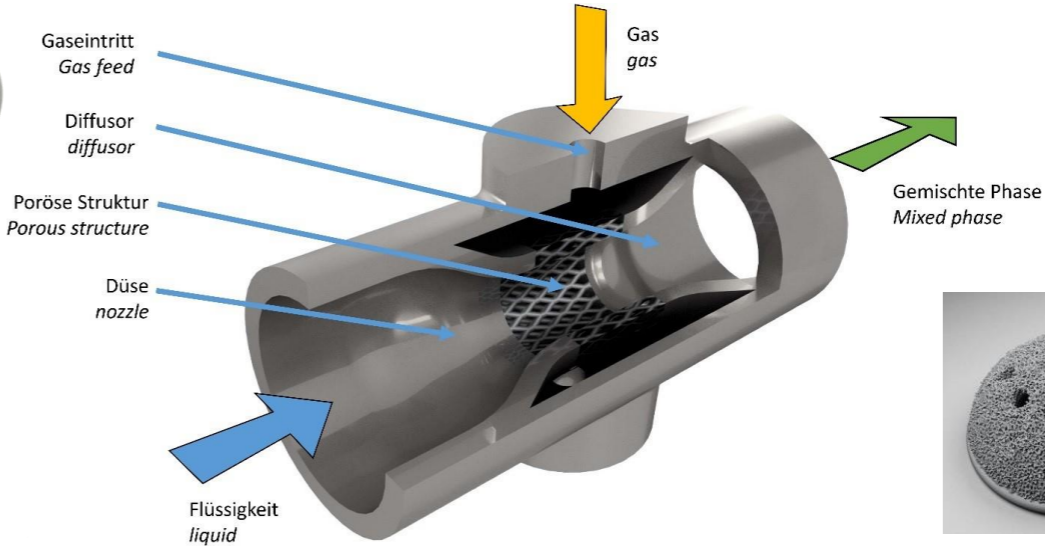
**Topologieoptimierung
& Leichtbau**



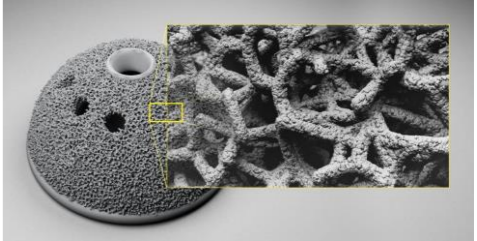
Teile- & Funktionsintegration



Hybridwerkstoffe & funktionale Oberflächen



Gitterstrukturen & Porositäten



Quellen: von links nach rechts: solidTHinking inspire; GE Aviation; <http://www.metalab.net>; JUREC

Agenda

- Einleitung
- Additive Fertigung am IFT
- Additive vs. konventionelle Fertigung
- **Topologieoptimierung**
- Funktionsintegration
- Design für LPBF-Prozess
- Fazit und Ausblick

Topologieoptimierung

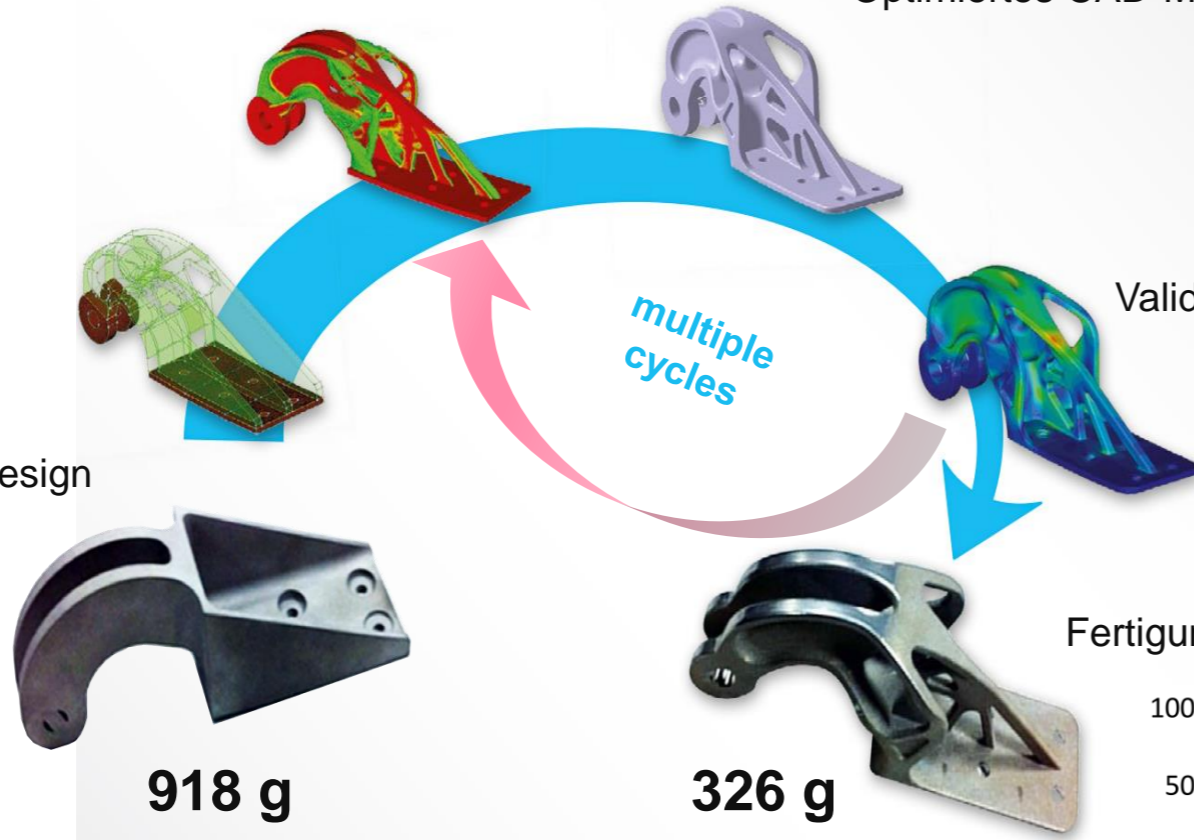
Vernetzung & Topologieoptimierung

Optimiertes CAD-Modell

Validierung

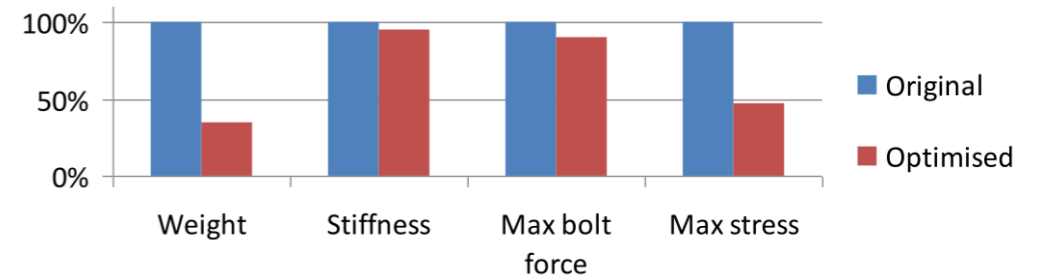
Fertigung

Ursprüngliches Design



918 g

326 g

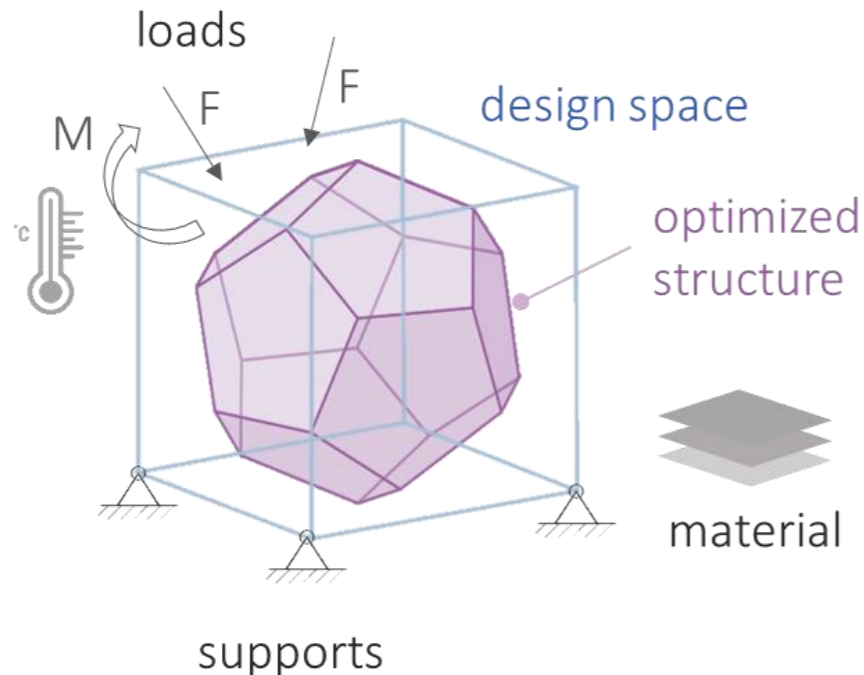


Quelle: Altair Engineering, EADS. 2011

Topologieoptimierung

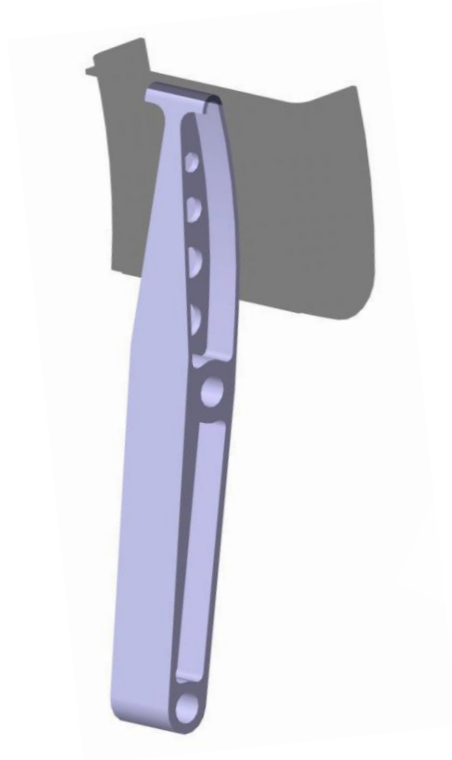
TO ist ein mathematischer, computergestützter Ansatz zur Optimierung der Materialausnutzung eines Teils oder Produkts unter gegebenen Randbedingungen.

Ziel: Verbesserung der Leistung des Teils oder Produkts. Typische Konstruktionsziele sind Steifigkeit oder Gewicht



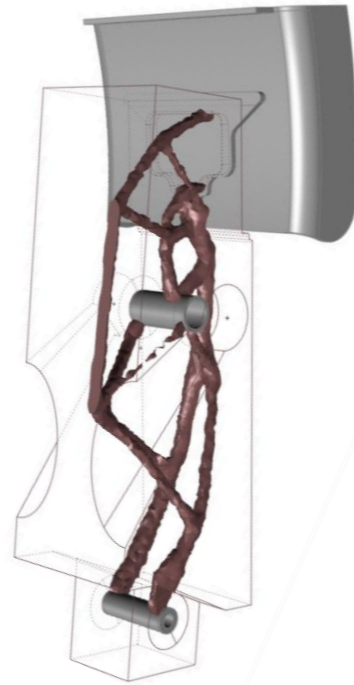
- **Erhöhung der Steifigkeit** eines Systems unter Beibehaltung des Gewichts
- **Verringerung des Gewichts** eines Systems unter Beibehaltung der Steifigkeit

Topologieoptimierung am IFT

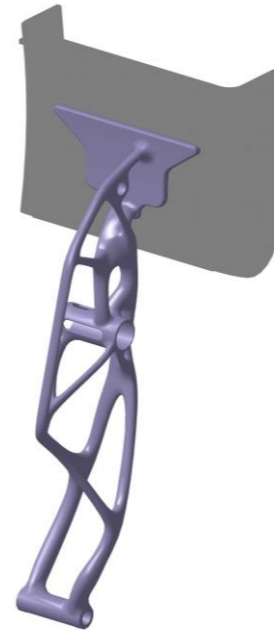


*Ausgangssituation:
Aluminiumfrästeil*

153 g



*Optimiertes
Design dank
solidThinking
Inspire*



*Bremspedal
nach
CAD-redesign*



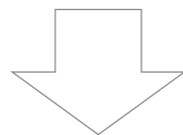
*3D-gedrucktes
Bremspedal aus Ti-6Al-4V*

108g

**Werkstoff: Ti-6Al-4V
Gewichtsreduktion: 30 %**

Topologieoptimierung am IFT

Greiferfinger für Roboterarm

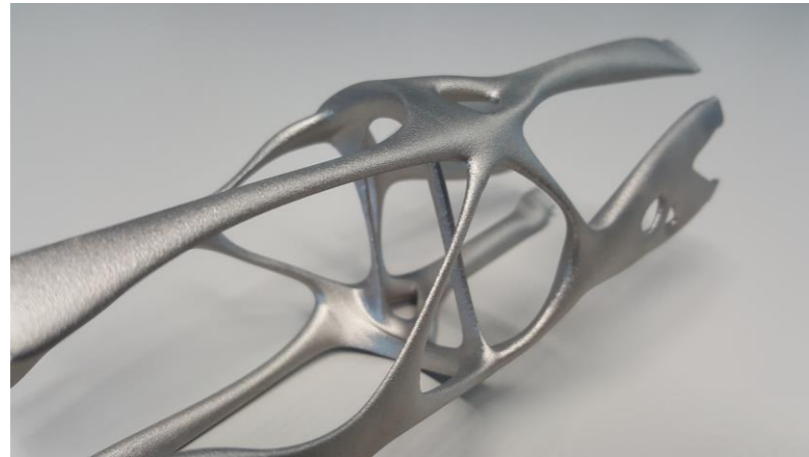


Quelle: AddLab@tugraz & SmartFactory, IFT

smartfactory@tugraz
LERNFABRIK FÜR AGILE UND DATENSICHERE FERTIGUNG

Topologieoptimierung am IFT

Motorhalter für Robotik



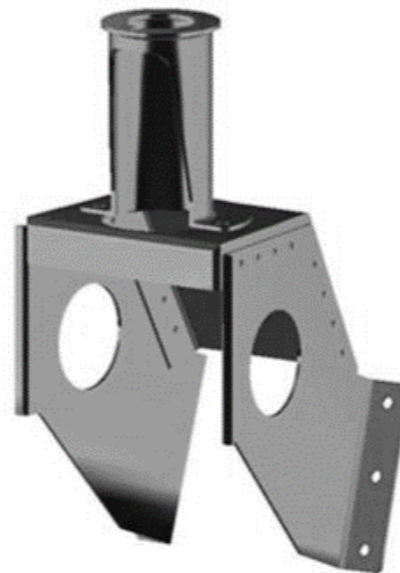
Quelle: AddLab@tugraz & SmartFactory, IFT

Topologieoptimierung - Raumfahrt (ESA)

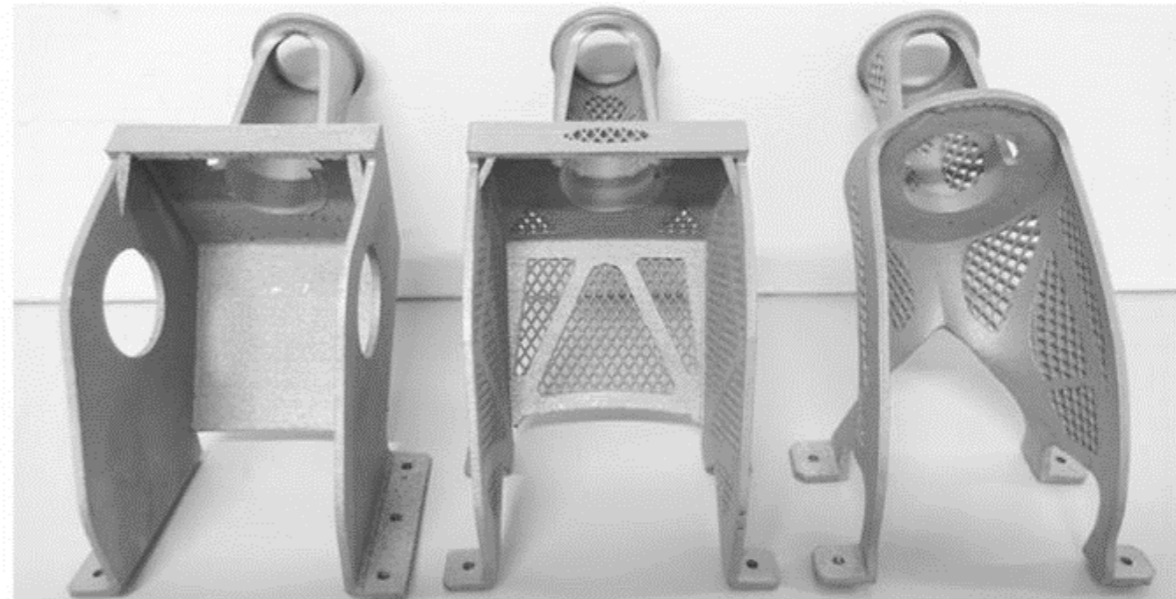
Nutzlast-Adapter



Adaptateur Charge Utile (ACU) of Space Launcher



Connector Support (original)
0.453kg
Assembled from 4 parts



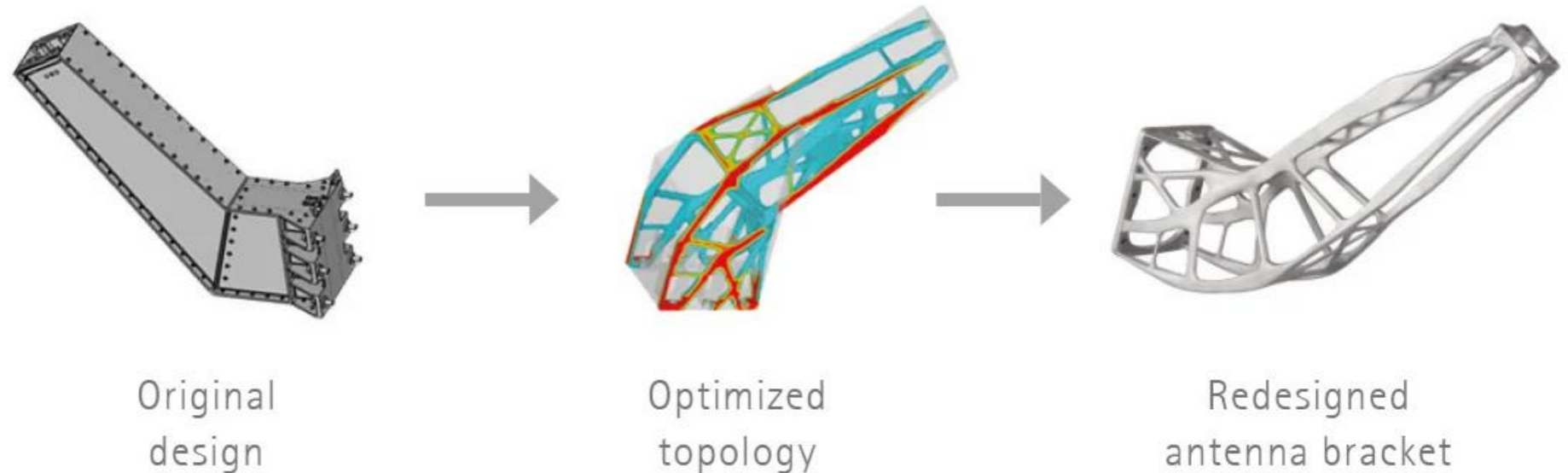
Integrated solution	Topology Optimized	Topology Opt. II
0.385kg	0.197kg	0.168kg
- 15% weight	- 56% weight	- 63% weight
1 part	1 part	1 part (bionic design)

Quelle: ESA, www.esa.int

Topologieoptimierung - Raumfahrt (RUAG)

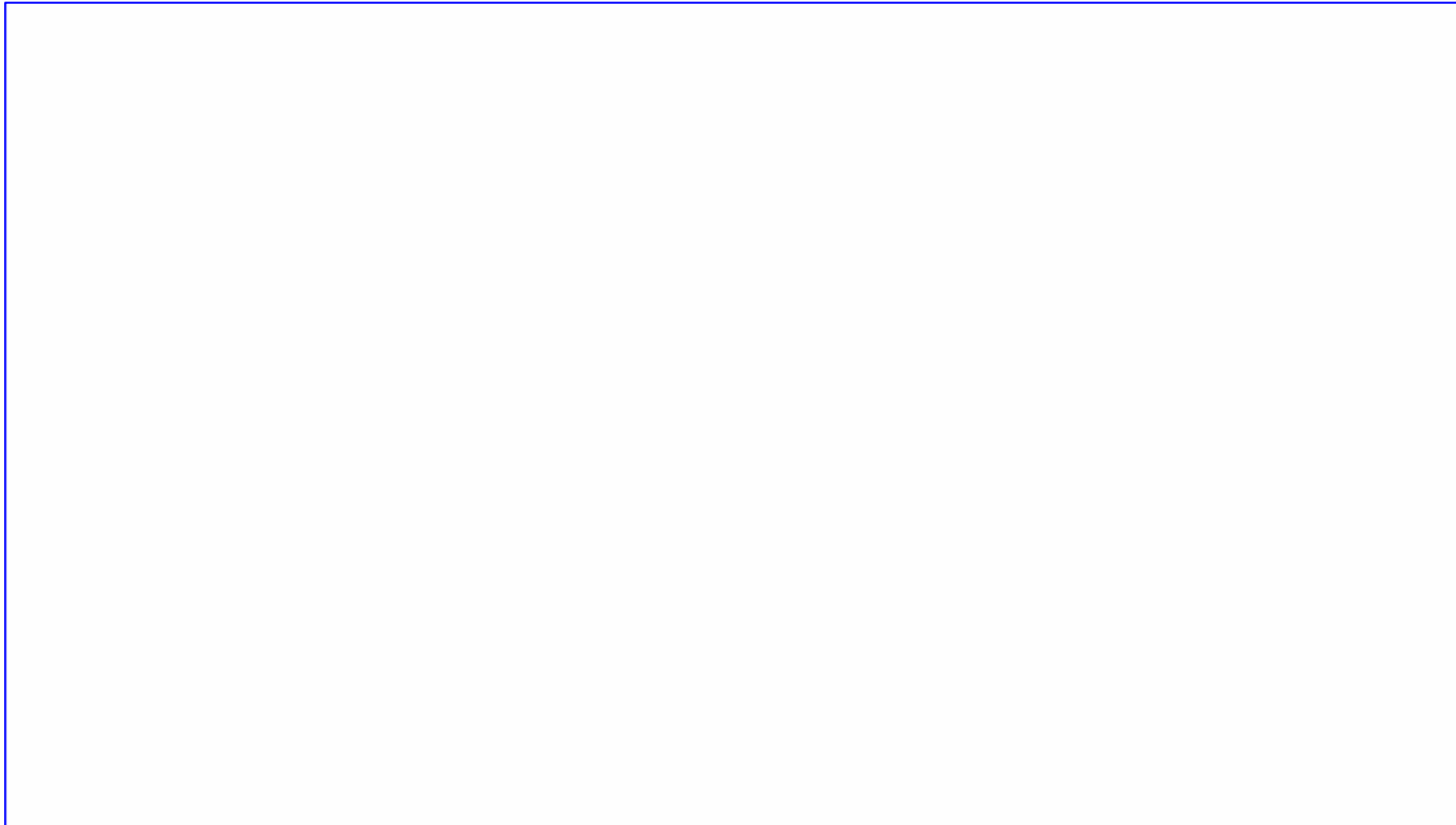
Antennenhalterung

- Leichtbau:
 - 40%
Gewichtseinsparung
- Werkstoff:
 - Aluminium
AlSi10Mg
- Stabilität:
 - 30% höhere
Steifigkeit



Quelle: <https://www.eos.info/en/all-3d-printing-applications/ruag-aerospace-3d-printed-satellite-components>

Topologieoptimierung - Raumfahrt (RUAG)



Quelle: https://www.eos.info/en/all-3d-printing-applications/ruag-aerospace-3d-printed-satellite-components#video_69289

Agenda

- Einleitung
- Additive Fertigung am IFT
- Additive vs. konventionelle Fertigung
- Topologieoptimierung
- **Funktionsintegration**
- Design für LPBF-Prozess
- Fazit und Ausblick

Funktionsintegration

Additive Fertigung ermöglicht durch hohe Gestaltungsfreiheiten die Integration von mehreren Funktionen in einem einzigen Bauteil.

- Reduktion von Baugruppen
- Integrierte (Kühl)-Kanäle
- Variable Bauteildichten (z.B. Filterelemente)
- Integrierte Elektronik (z.B. Sensoren)
- Hybrid Werkstoffe (Multi-Materialiendruck)



Reduktion von Bauteilen (von 42 auf 1) mittels nTopology
 Quelle: <https://ntopology.com/>

Funktionsintegration

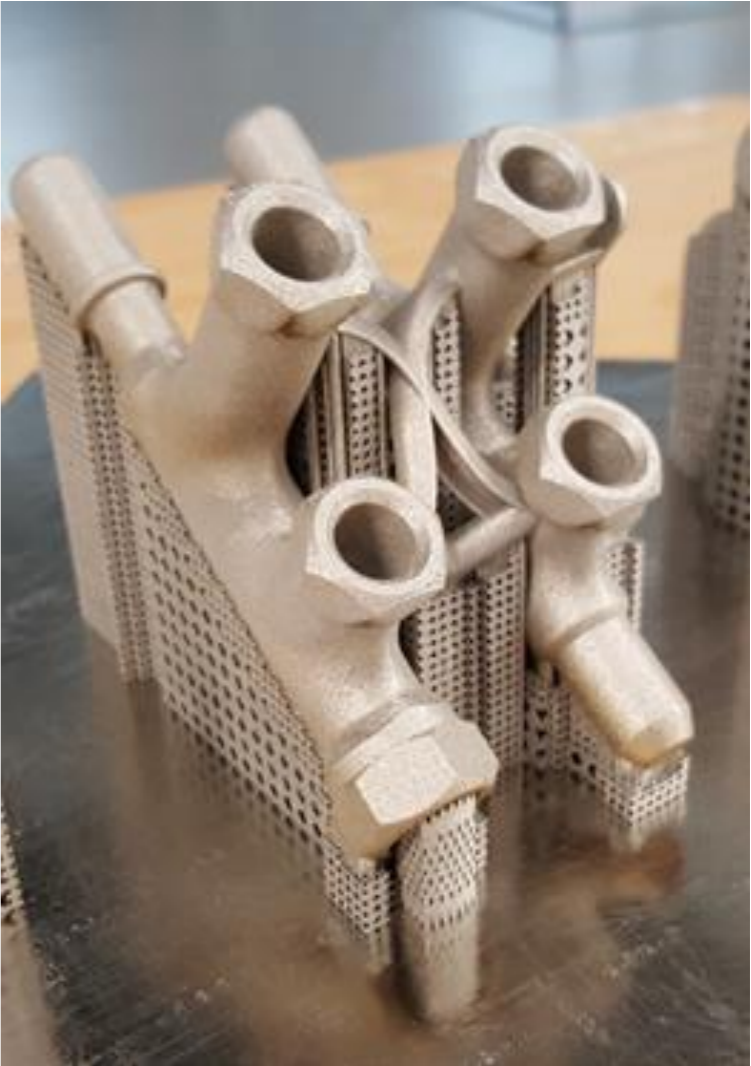
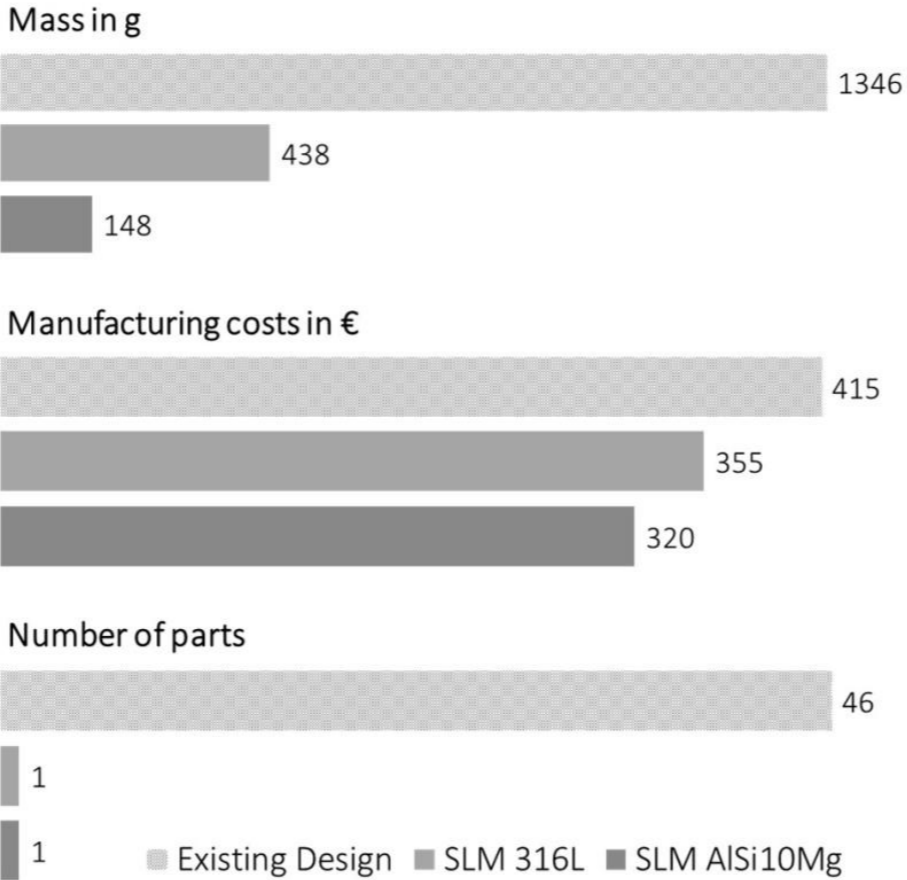
Treibstoffdüse

- Leichtbau
 - 25% Gewichtseinsparung
- Verbesserte Effizienz
 - Geringerer Treibstoffverbrauch
- Funktionsintegration
 - Bauteilreduktion von 18 auf 1
- Langlebigkeit
 - 5x höhere Lebensdauer



Quelle: <https://www.eplus3d.com/metal-3d-printing-achieves-lightweight-manufacturing-in-aerospace-industry.html>

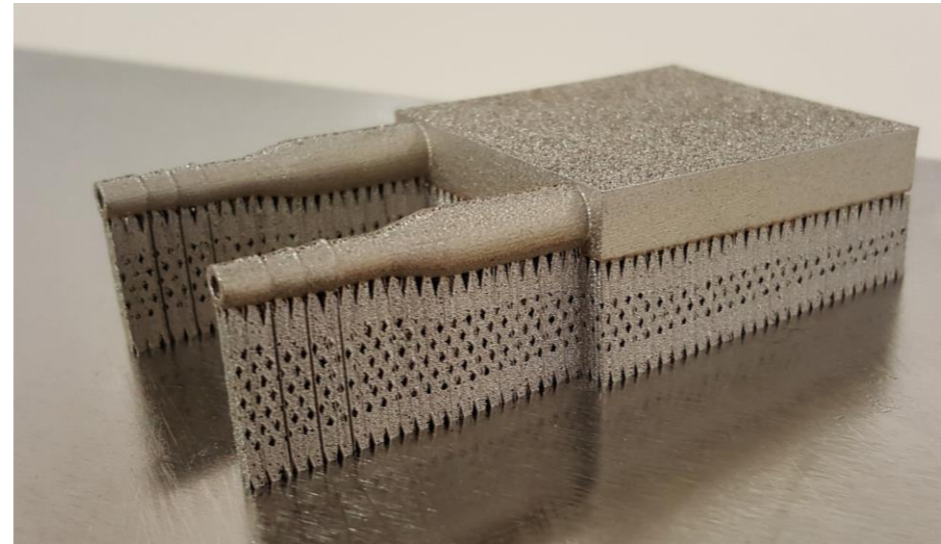
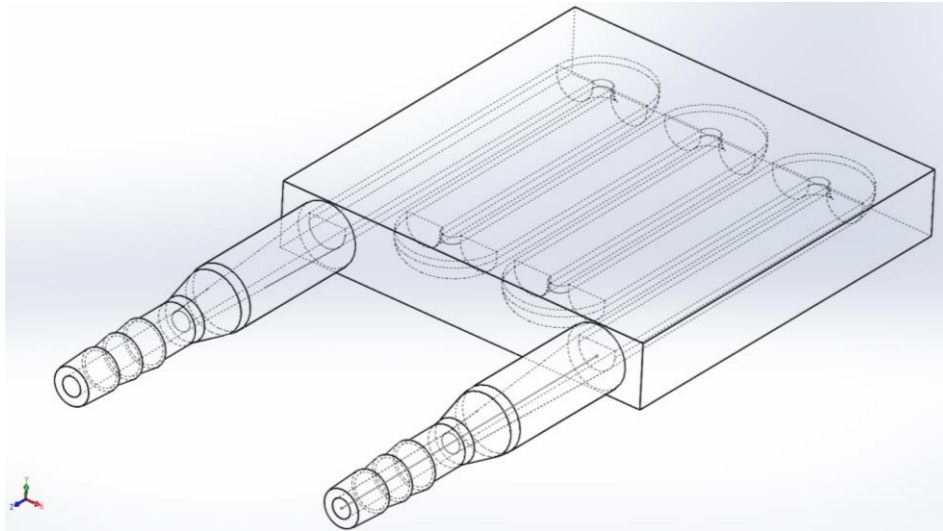
Funktionsintegration am IFT



Quelle: eigene Darstellung; in Anlehnung an Karanovic (2018), p. 99

Funktionsintegration am IFT

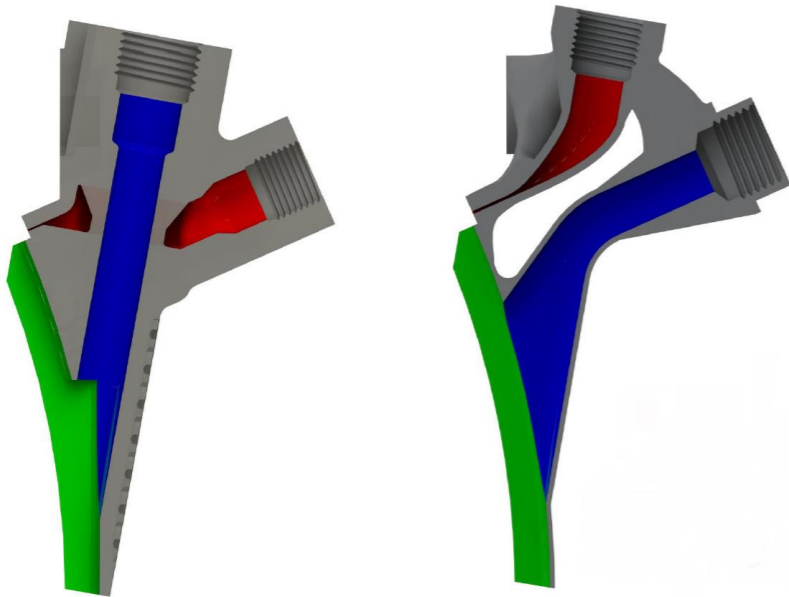
Wärmetauscher mit konturnahen Kühlkanälen



Quelle: AddLab@tugraz, IFT

Funktionsintegration am IFT

Strömungs- und topologieoptimierte Kühlmitteldüse

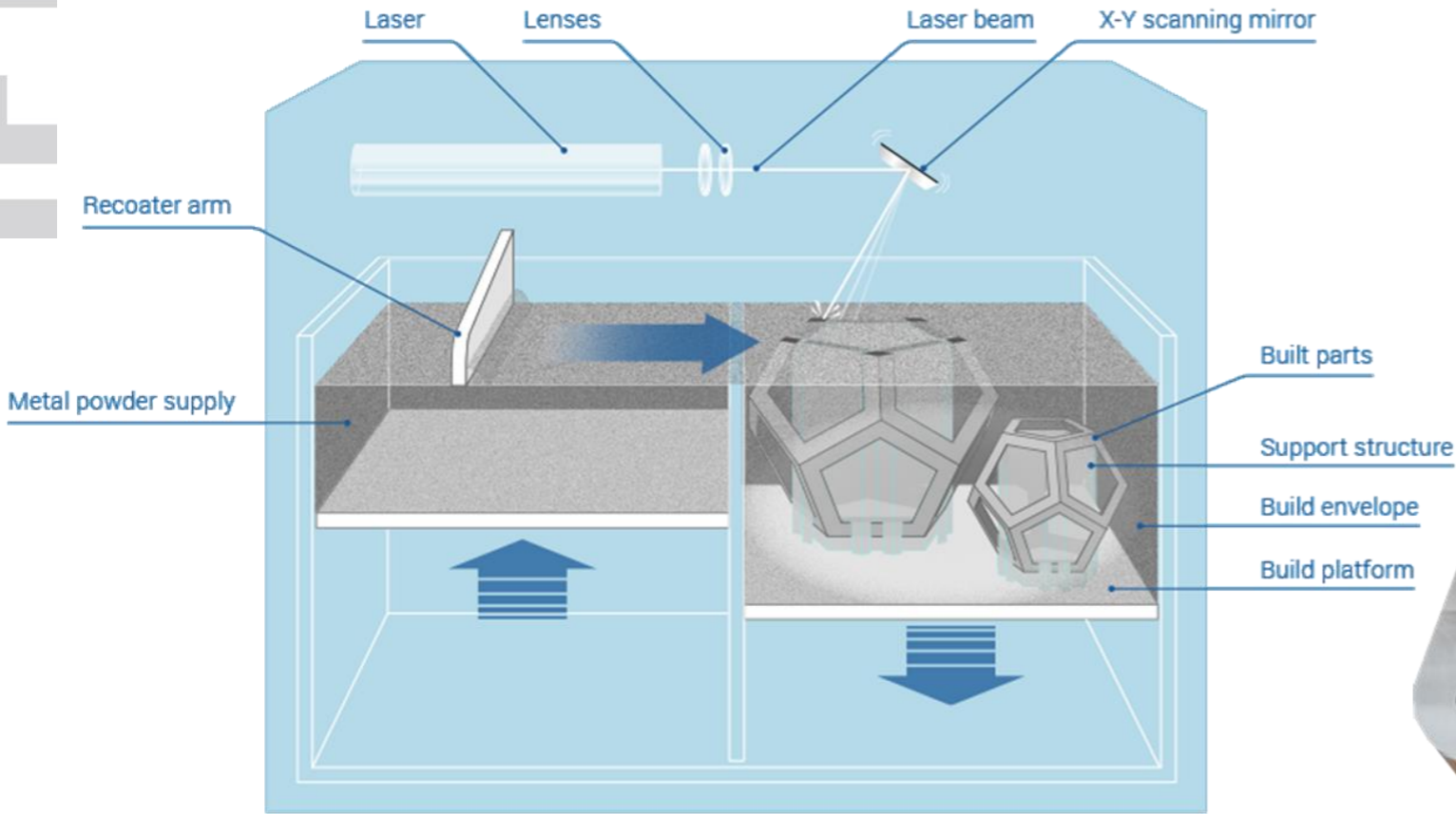


Quelle: AddLab@tugraz,IFT

Agenda

- Einleitung
- Additive Fertigung am IFT
- Additive vs. konventionelle Fertigung
- Topologieoptimierung
- Funktionsintegration
- **Design für LPBF-Prozess**
- Fazit und Ausblick

Designaspekte für LPBF-Prozess



Selektives Laserstrahlschmelzen, Quelle: www.additively.com



SLM-Teile nach dem Druckprozess
Quelle: AddLab@tugraz, IFT

Design-Aspekte für LPBF-Prozess

Werkstoffe und
mechanische
Eigenschaften

Stützstrukturen

Bauteil-Orientierung

Post-Processing

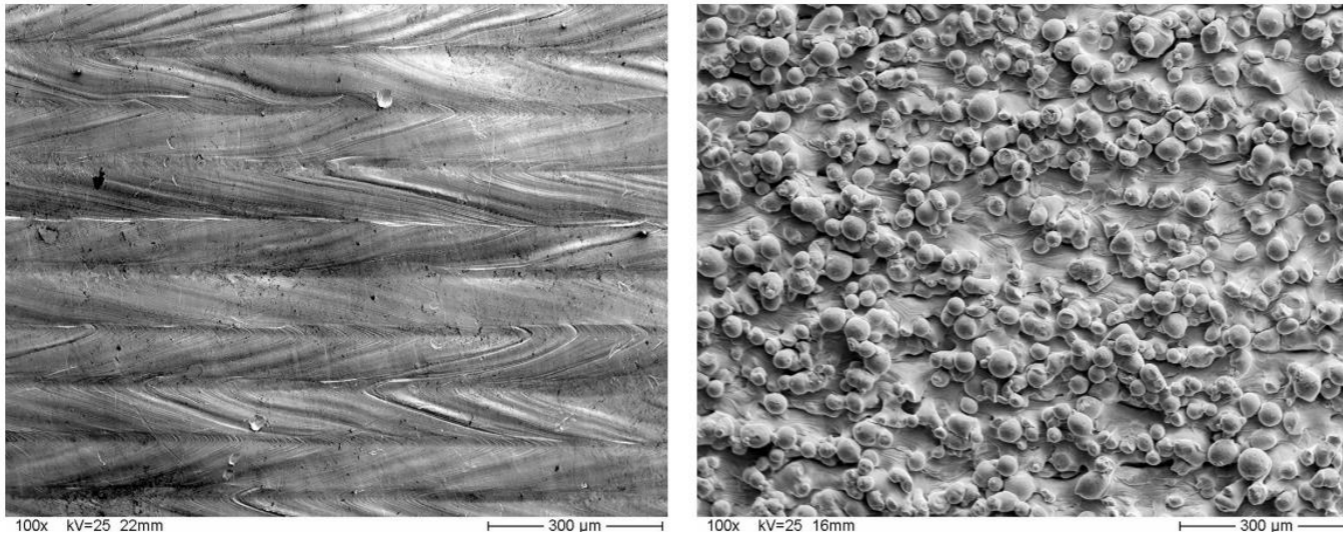
Spezielle Aspekte
z.B. Spannen bei
Nachbearbeitung

Werkstoffe und mechanische Eigenschaften

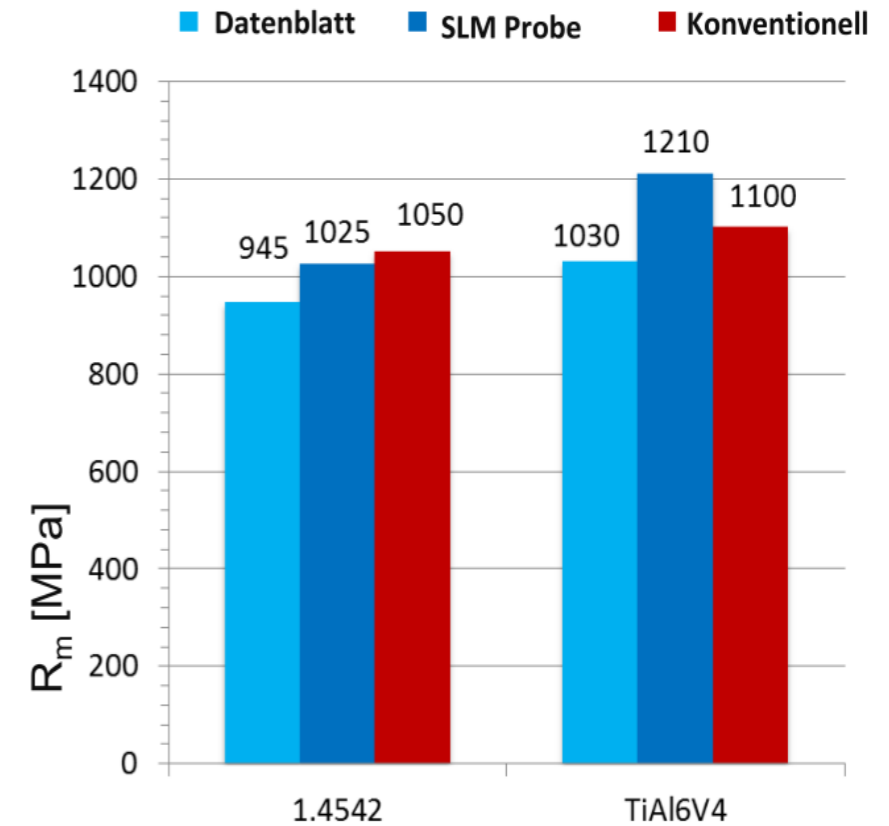
- Hauptsächlich Metalle und metallische Legierungen
- Voraussetzung: Schweißbarkeit des Werkstoffs!
- Hohe relative Dichte erreichbar $> 99\%$
- Gute mechanische Eigenschaften
- Hochfeste Werkstoffe können verarbeitet werden.
- Nachfrage an speziellen Legierungen für LBM-Verfahren

Werkstoffe und mechanische Eigenschaften

- Zugfestigkeit und Streckgrenze sind mit herkömmlichen Materialien vergleichbar.
- Oberflächenqualität hängt stark von Aufbaurichtung ab.



Oberflächenqualität von SLM-Teilen. links: X-Y-Richtung; rechts: Z-Richtung
Quelle: Abele, 2014



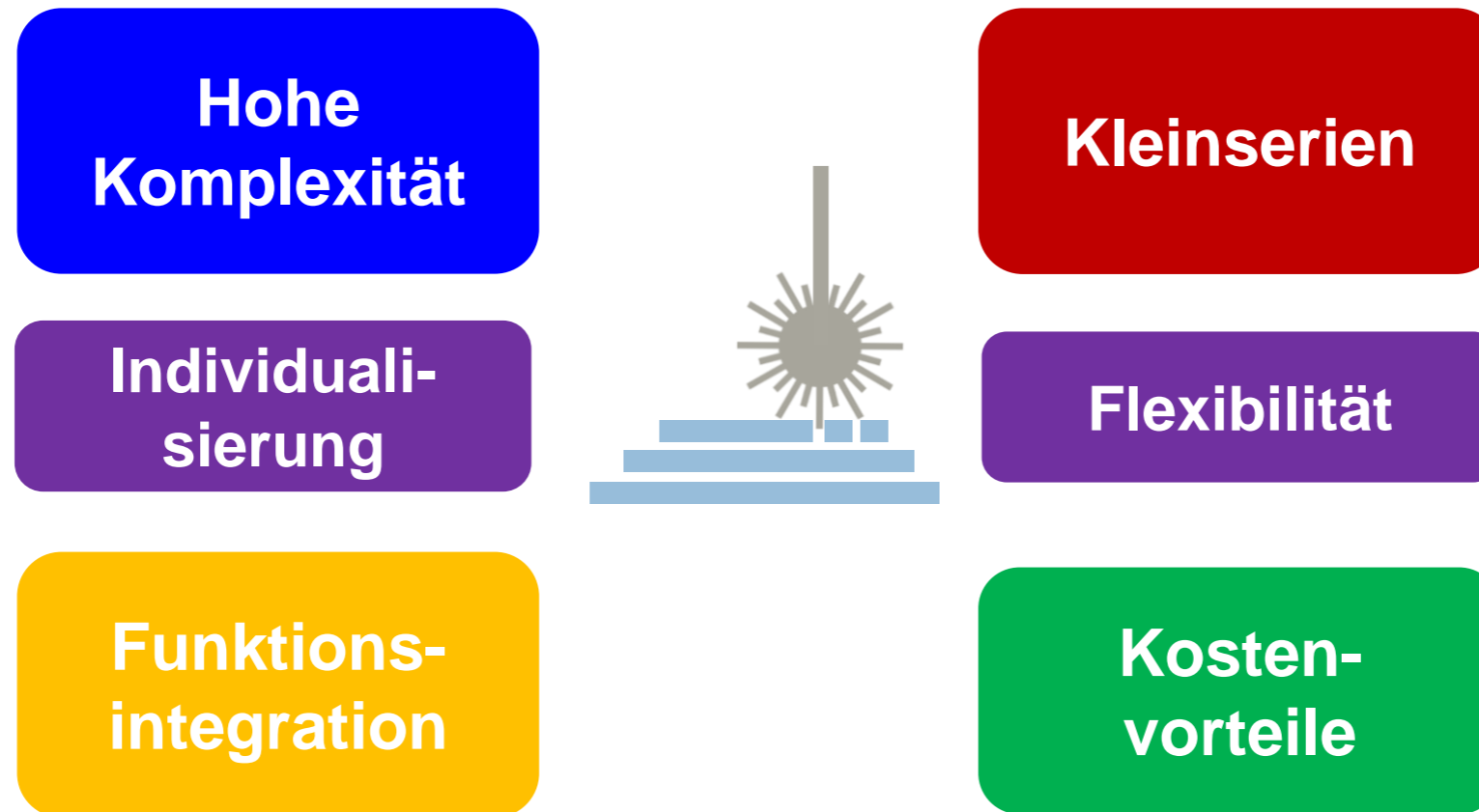
Vergleich der Zugfestigkeiten
Quelle: Abele, 2014

Agenda

- Einleitung
- Additive Fertigung am IFT
- Additive vs. konventionelle Fertigung
- Topologieoptimierung
- Funktionsintegration
- Design für LPBF-Prozess
- **Fazit und Ausblick**

Fazit

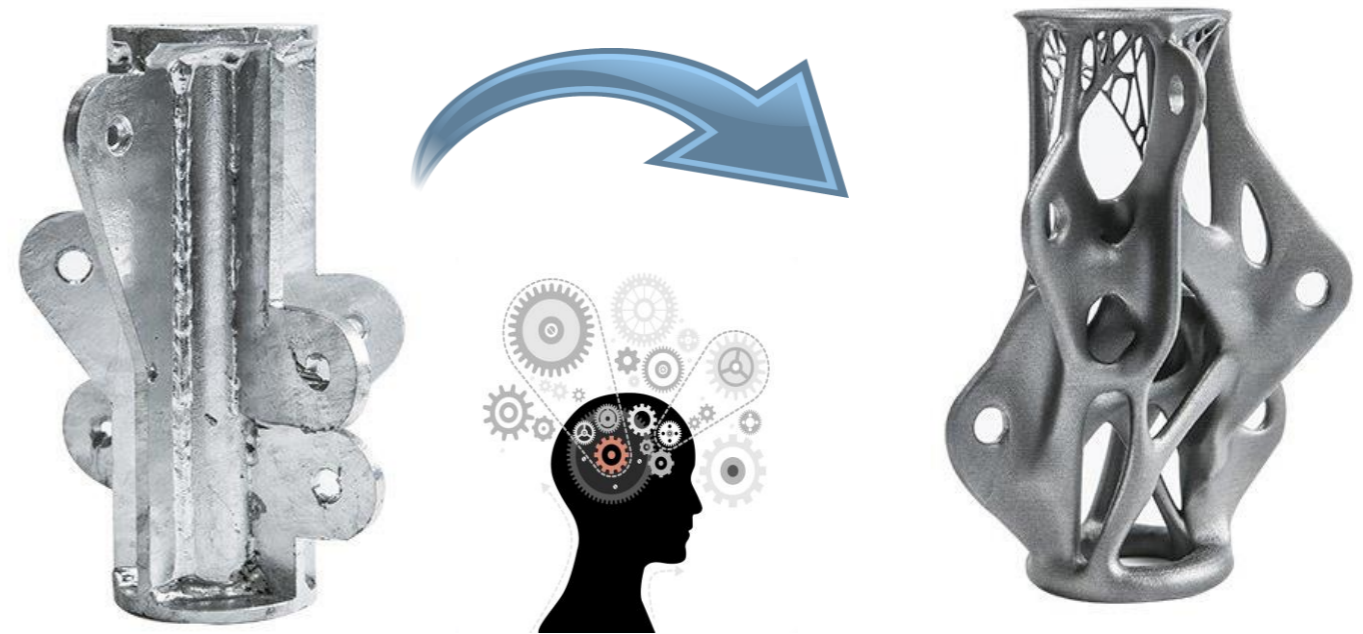
- Derzeitige Einsatzfelder der Additiven Fertigung



Fazit

- AM öffnet neue Wege der Bauteilgestaltung.
- AM als Ergänzung und nicht als Ersatz zur konventionellen Fertigung.
- Neue Denkweisen des Produktdesigns zur vollen Ausschöpfung der AM-Potentiale erforderlich.

“Additive Thinking”



Strukturbauteil; links: geschweißtes, konventionelles Design; rechts: optimiertes AM Design

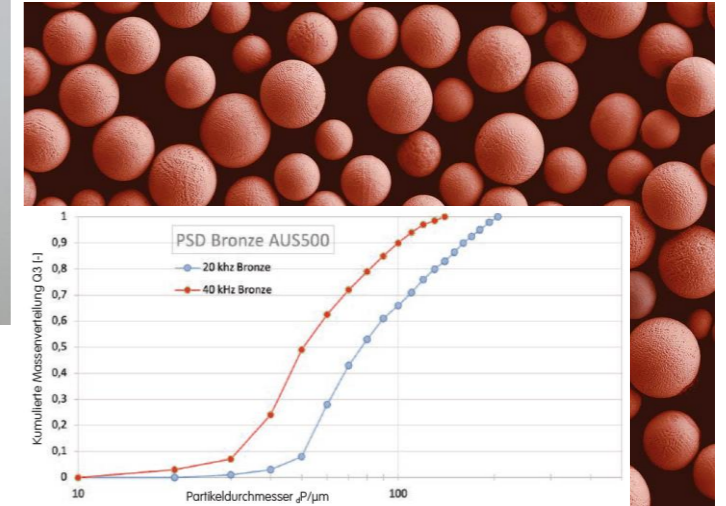
Quelle: Davidfotografie/Arup

Ausblick

- **Neue Fertigungsprozesse**
- **Weiterentwicklung der Verfahren**
 - Multi-Laser, große Bauvolumina
- **Neue Werkstoffe für AM**
- **Neue Verfahren zur Pulverherstellung**
- **Neue Anwendungen** neben Automobil, Rennsport, Luft- und Raumfahrt
 - Gewichtseinsparungen durch neue Designmöglichkeiten
- **Reduktion von Teilen in Baugruppen**
- **Additive und Konventionelle Fertigung kombinieren – Stärken bündeln.**



<https://www.canadianmetalworking.com>



<https://www.amazemet.com/aus500/>



Quelle: <https://issuu.com/ipmediaonline/>