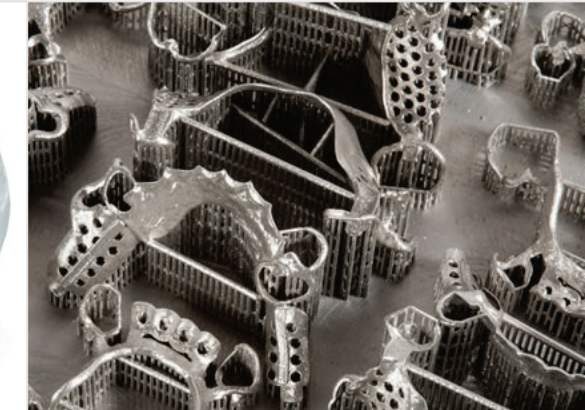
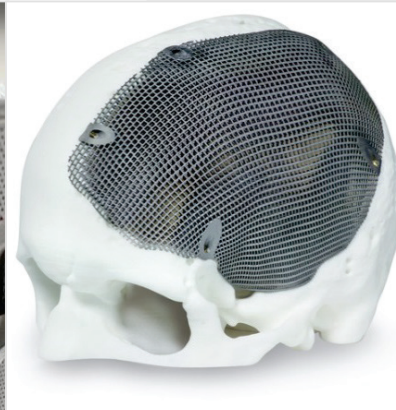


# DESIGN FÜR DIE ADDITIVE FERTIGUNG



Wintersemester 2021/22



## GLIEDERUNG

1. **Motivation (I): Einführung in das Thema Fertigung und Fertigungsplanung**
2. **Motivation (II): Konstruktionsrichtlinien / -möglichkeiten**

# Neue Konstruktionsansätze: Potentiale



Fuel Nozzle (19)

Lighter in weight

Simpler design-parts reduced

New design features – higher durability

By 2020 will produce more than 100,000 parts

## GE Aviation LEAP Engine

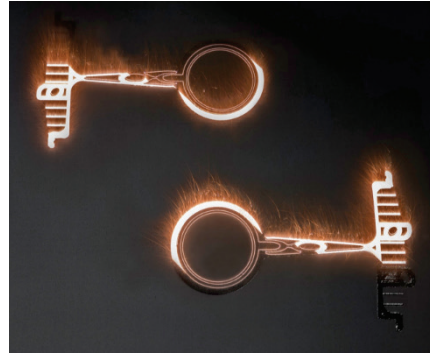


CFM LEAP Aircraft Engine

25%

18 to 1

5X



# Neue Konstruktionsansätze: Potentiale

Realisierung von struktur- und strömungsoptimierten Bauteilen

Funktionsintegration (Differential- vs. Integralbauweise)

Hoher Individualisierungsgrad und geringe Stückzahlen

Reduktion Materialeinsatz bei teuren Werkstoffen



## In-prozess Fügen von Materialien und Teilen / AM auf existenten Teilen



# Oberbegriff Leichtbau

Kein überflüssiges Material

Lastoptimiertes Design

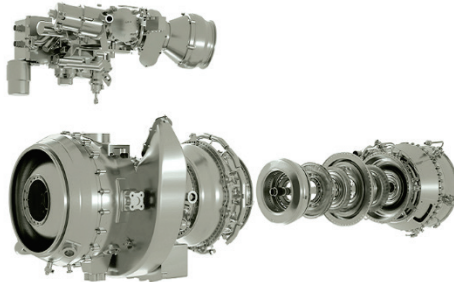
Hohle Strukturen

Komplexe Zellstrukturen / Knochen

Ansätze der Optimierung existenter Designs als auch der Anwendung bionischer/natürlicher Designs

Leichtbau ist auch auf Basis neuer Materialien und neuer Fertigungsverfahren realisierbar

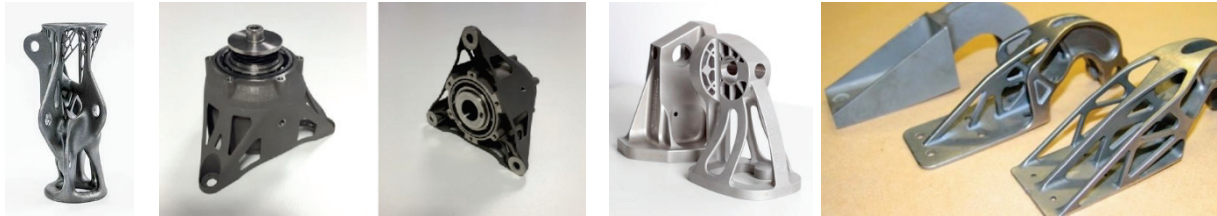
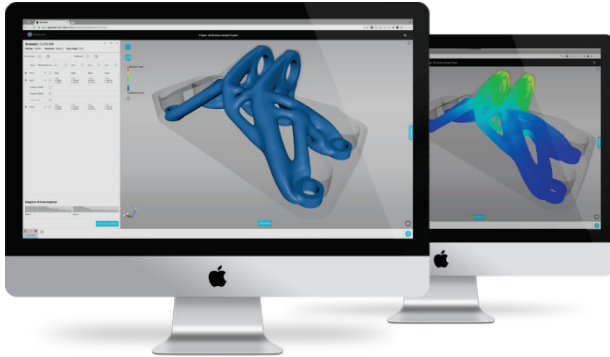
Leichtbau durch neue Fertigungstechnologien -  
> höhere Integration bei gleichem Material



Leichtbau durch neue Fertigungstechnologien -  
> höhere Belastbarkeit durch neues Material



# Material an der richtigen Stelle: Topology Optimization

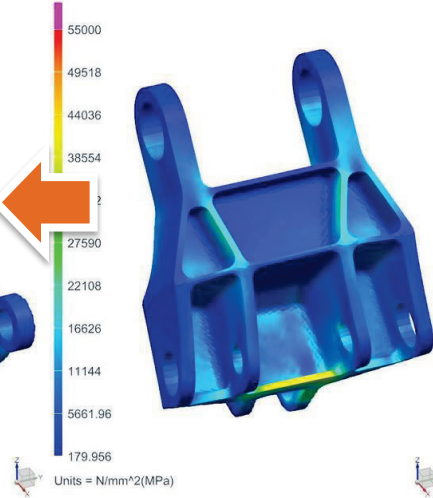


# Topology Optimization: Beispiel

topoptonly\_fem1\_sim1 : Solution 1 Result  
 Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
 Stress - Elemental, Averaged, Von-Mises  
 Min : 179.956, Max : 94362.2, Units = N/mm<sup>2</sup>(MPa)  
 Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

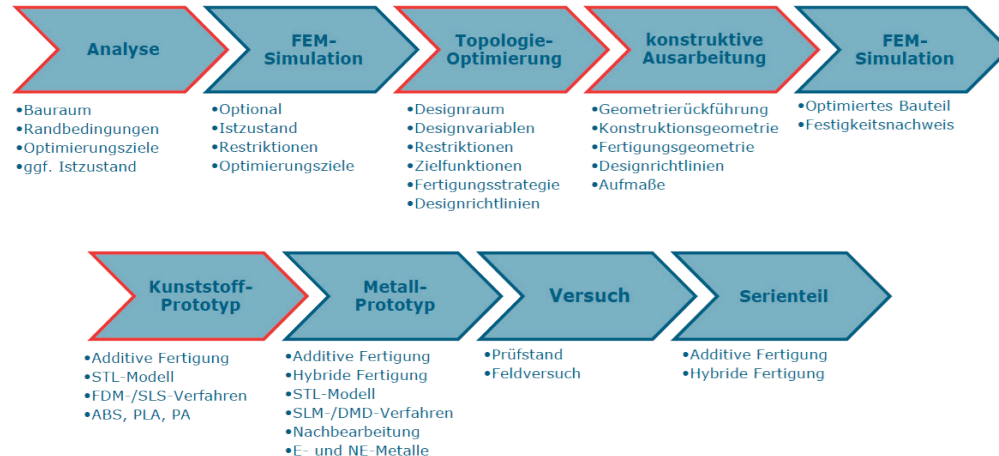


Imported Result : original\_scaled\_fem1\_sim1\_solution\_1  
 SUBCASE - STATIC LOADS 1  
 Stress - Elemental, Averaged, Von-Mises  
 Min : 36.6803, Max : 50029, Units = N/mm<sup>2</sup>(MPa)  
 Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



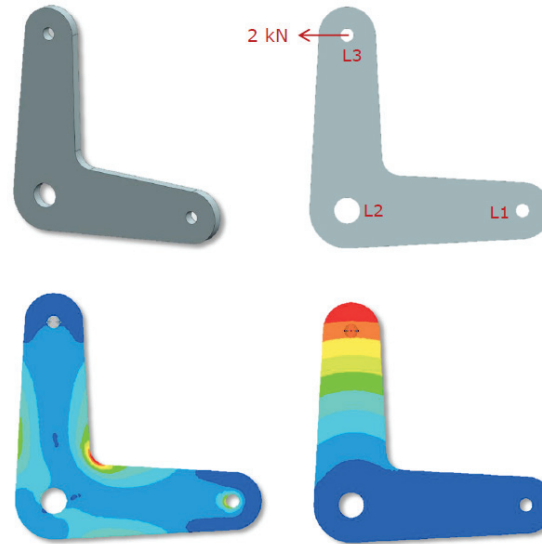
# Topology Optimization: Beispiel

Betrachtung verschiedener rein mechanischer Komponenten  
 Topologieoptimierung mit OptiStruct und SolidThinking Inspire  
 Sensitivitätsuntersuchung für die Randbedingungen  
 Rückführung der optimierten Geometrien in 3D-CAD-Modelle  
 Additive Fertigung Prototypen mit Fused Deposition Modeling (FDM)



# TopOpt am Musterbauteil

- Einfaches Bauteil
  - Klassischer Winkelhebel
  - Symmetrische Geometrie
  - 140 mm Lagerabstände
  - 10 mm Wandstärke
  - Werkstoff: S355
  - Volumen: ca. 156 cm<sup>3</sup>
  - Gewicht: ca. 1248 g
  
- Topologieoptimierung:
  - OptiStruct
  - solidThinking Inspire



# TopOpt am Musterbauteil: allgemeine Randbedingungen

Fertigungsstrategie muss frühzeitig festgelegt werden:

- Fertigungsverfahren, Fertigungsanlage, Bauteilausrichtung
- Werkstoffsubstitution → Stahl (1.2709, X3NiCoMoTi18-9-5)
- Werkstoffkenndaten (Verfahrensspezifisch)
- Nachbearbeitung (Wärmenachbehandlung, Zerspanung)
- Fertigungsrestriktionen (z.B. nach VDI 3405-3) sind zu beachten

Zielkonflikt:



## TopOpt am Musterbauteil: Randbedingungen solid Thinking Inspire

Zielfunktion:

- Steifigkeit maximieren

Masseziele:

- 30 % des Designbereichvolumens

Dickenrestriktion:

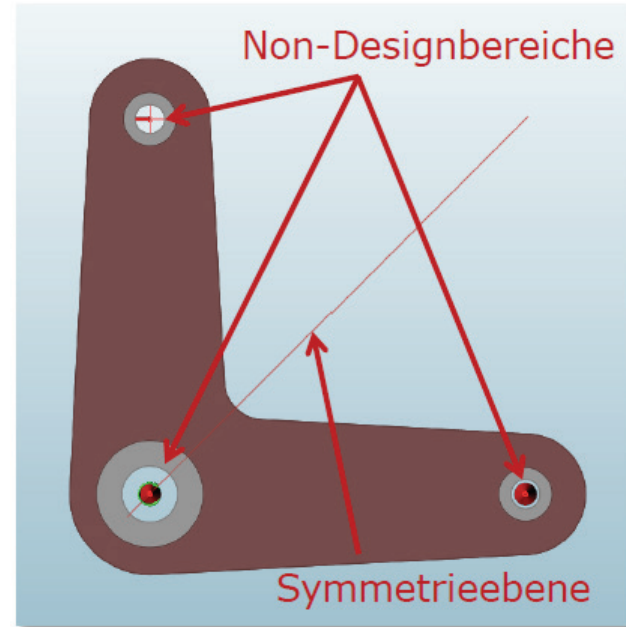
- Minimum 10 mm

Fertigungsrandbedingung:

- 45° Symmetrieebene

Softwareversion:

- solidThinking Inspire 2016 Beta



# TopOpt am Musterbauteil: Randbedingungen OptiStruct

Zielfunktion:

- Steifigkeit maximieren (min compliance)

Systemantworten:

- compliance und massfrac

Dickenrestriktion:

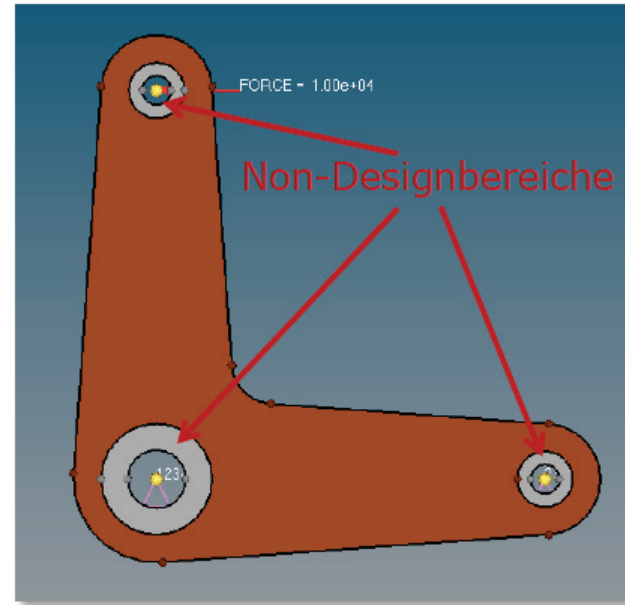
- Minimum 10 mm

Fertigungsrandbedingung:

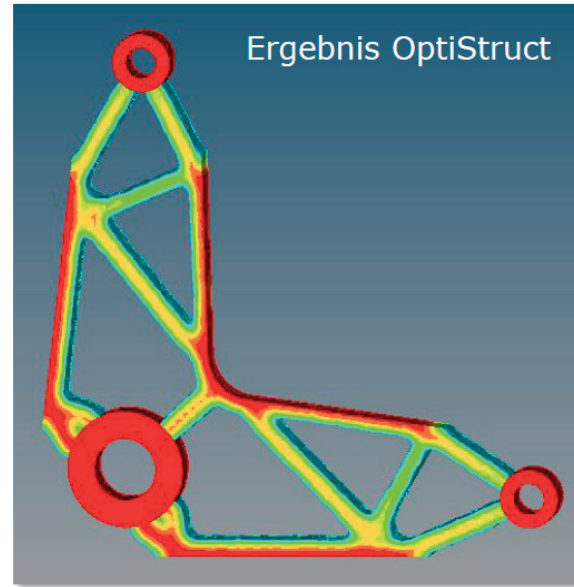
- 45° Symmetrieebene

Softwareversion:

- Hyperworks OptiStruct 13



# TopOpt am Musterbauteil: Ergebnis



# TopOpt Umsetzung: Ziele der konstruktiven Ausarbeitung

Bereitstellung der finalen Bauteilgeometrie als 3D-CAD-Modell

- Fertigungs- und beanspruchungsgerecht

Konstruktionsgeometrie

- Endmaßgeometrie (inklusive Funktionsflächen)
- Basis für Festigkeitsnachweise (statisch, dynamisch)

Fertigungsgeometrie

- Ausgangsgeometrie für die additive Fertigung (Rohteil)
- Wird (spanend) zur Endmaßgeometrie nachbearbeitet

# TopOpt Umsetzung: Facettenmodell vs. parametrisches Modell

Ausgangsbasis der konstruktiven Ausarbeitung:

- Facettenmodell aus Topologieoptimierung

Direkte Verwendung als Konstruktions- und Fertigungsgeometrie?

- Fertigungs- und Gestaltrestriktionen (für alle Verfahren!)
- Modellanforderungen für nachgelagerte Prozessschritte
- Facettenmodellbasierte Umsetzung erfordert Spezialsoftware, Know-How und ist zeitaufwendig

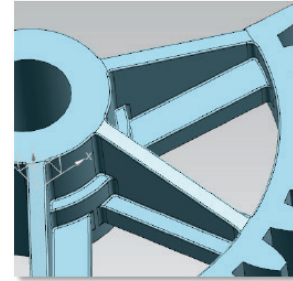
Rückführung in parametrisches 3D-CAD-Modell sinnvoll

Konstruktive Anpassung des parametrischen 3D-CAD-Modells

# TopOpt Umsetzung: Rückführung in parametrisches Modell

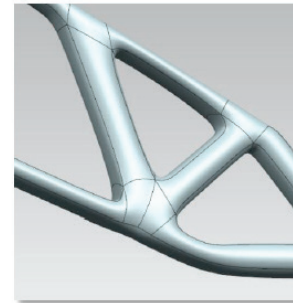
## Variante 1: Vereinfachtes Modell

- Volumenbasierte Modellierung
- Constructive Solid Geometry (CSG)
- Verschiebegeometrien (Rotation, Extrusion, etc.)
- Eingeschränkter Gestaltungsspielraum



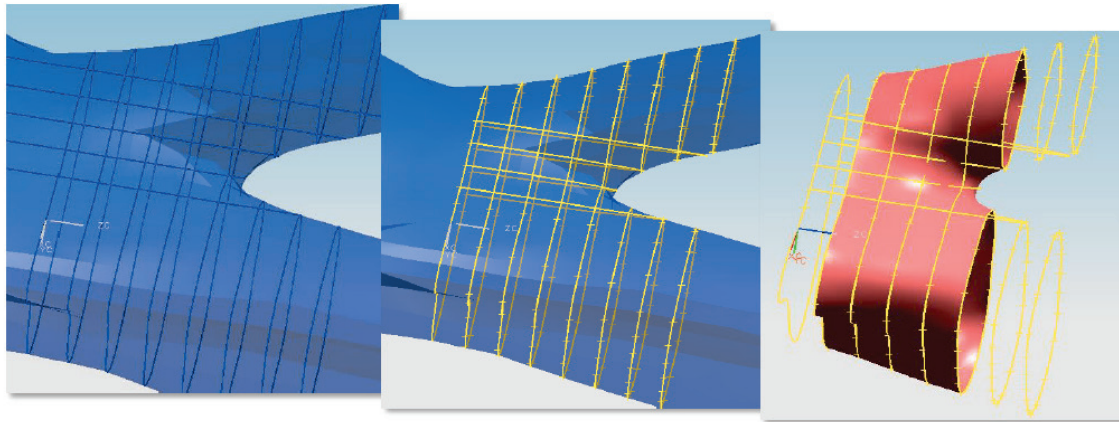
## Variante 2: **Detailgetreues Modell**

- Flächenbasierte Modellierung
- NURBS-Kurven und NURBS-Flächen
- Subdivision Surfaces (Konvertierung in NURBS)
- Prinzipiell jede beliebige 3D-Geometrie abbildbar



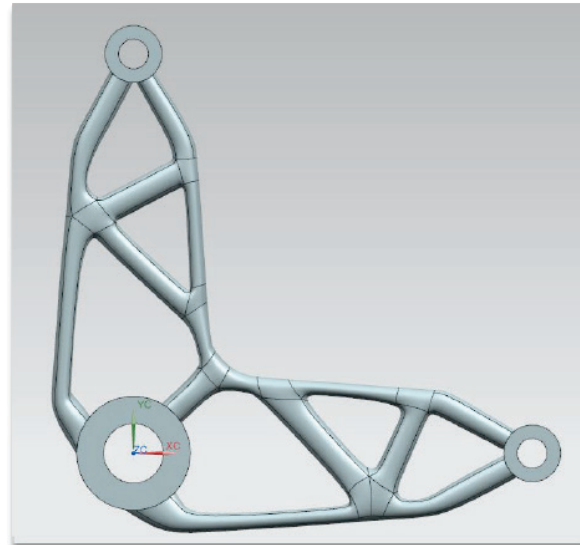
## TopOpt: Flächenbasierte Rückführung – Möglichkeiten der Umsetzung

Rekonstruktion des Facettenmodells bzw. der Bauteiloberfläche über Patches von NURBS-Flächen, z.B. mit Siemens NX



## TopOpt: Flächenbasierte Rückführung – Möglichkeiten der Umsetzung 2

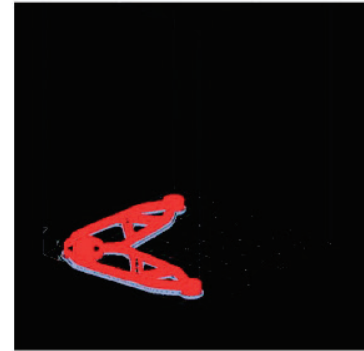
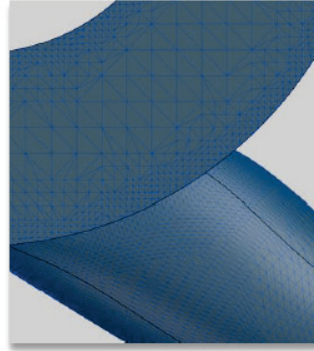
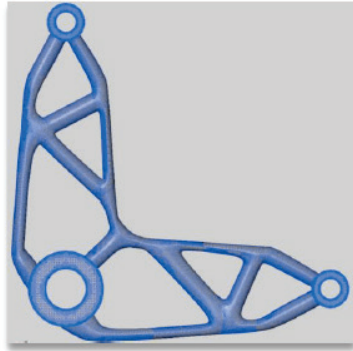
Rekonstruktion des Facettenmodells bzw. der Bauteiloberfläche über Patches von PolyNURBS mit solidThinking Inspire 2016 Beta



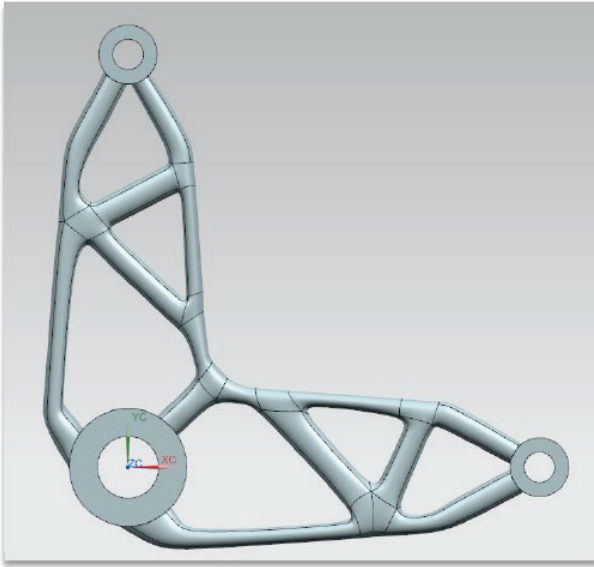
# TopOpt: Erstellen der Daten und AM

## Erzeugung STEP-Modell

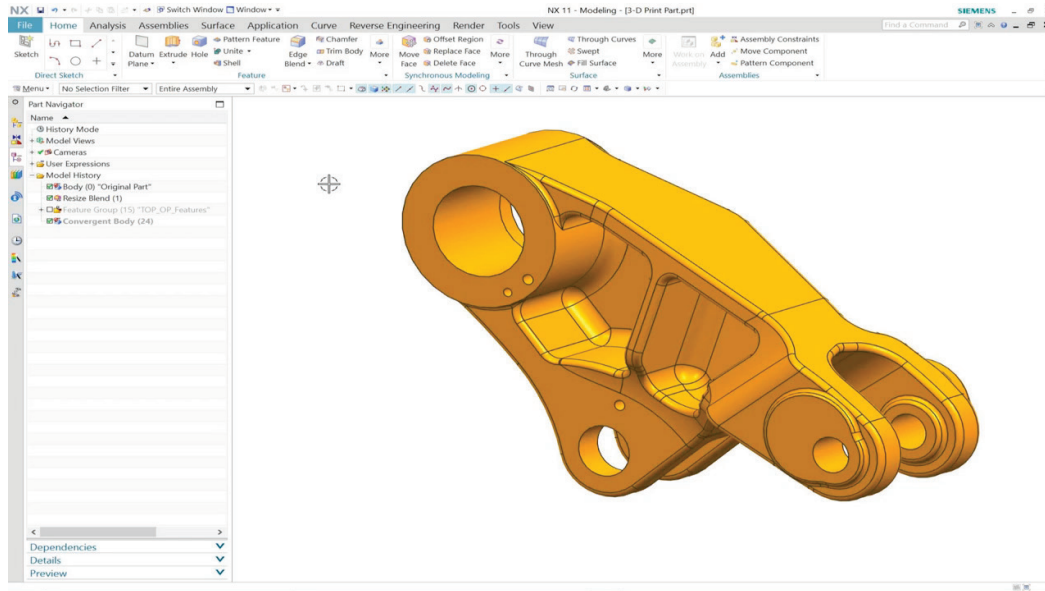
- Erzeugung STL-Modell mit GOM Inspect
- Slicing und Stützstrukturgenerierung
- Anlage: Stratasys Dimension Elite (ABS)
- Verfahren: Fused Deposition Modeling



# TopOpt: Additiv gefertigtes Bauteil



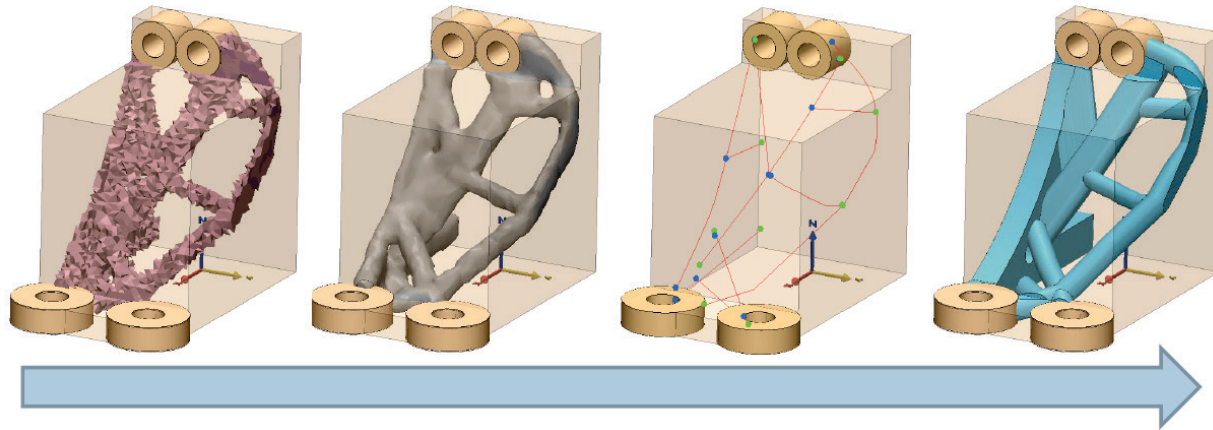
# Topology Optimization: Beispiel



# Topology Optimization: Neue Softwareansätze zum AM-gerechten Design

Arbeiten direkt in TopOpt Daten (Materialise 3-matic)

Oberflächenrekonstruktion, Dreiecke reduzieren, Glätten, Reparieren



*Aufbereiten – Vereinfachen – Neuentwurf*

## Das richtige Material an der richtigen Stelle / hybride Prozesskette



## Das richtige Material an der richtigen Stelle / hybride Prozesskette 2

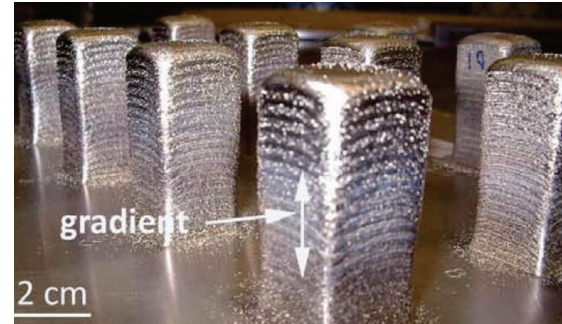
# DMG MORI



[www.dmgmori.com](http://www.dmgmori.com)

# Das richtige Material an der richtigen Stelle: Functionally graded material

Graduelle Anpassung der Eigenschaften möglich  
 Weiterentwicklung der core/shell (Beschichtung)  
 Technologie

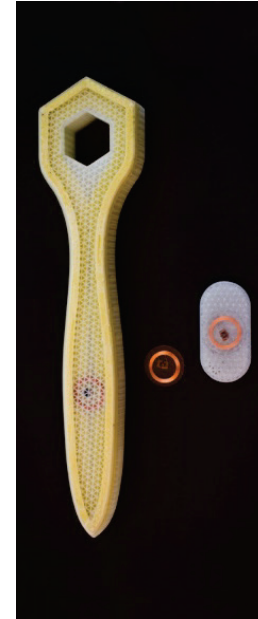


# Polymer Multi-Material im AM Prozess

Company	Process	Materials	Fiber	Build Size (X,Y,Z)	Example Parts
<b>MarkForged</b> (Somerville, MA, US)	FFF, CFF*	Nylon Carbon, glass and aramid filaments	Continuous	320mm x 132mm x 160mm	Brackets, racecar and UAV components, impellers, shoe soles w/ RFID, space wrench
<b>ORNL</b> (Knoxville, TN, US) <b>Cincinnati Inc.</b> (Harrison, OH, US)	BAAM, modified FDM	PEEK, PEKK, ABS, PPS, PPSF/PPSU, PEI Chopped carbon fiber, CNTs	Chopped	2m x 4m x 0.9m 6m x 2.4 x 1.8m	<i>Strati</i> car, tooling for Cherry Point Marine Corps Air Station, furniture
<b>Arevo Labs</b> (Silicon Valley, CA, US)	FDM	PEEK, PPSU, PEI, self-reinforced <u>polyphenylene</u> (SRP) Chopped carbon fiber, CNTs	Chopped		
<b>3D Alchemy</b> (Edmond, UK)	SLS	Short fiber filled nylon powder	Chopped/milled		
<b>Graphite Additive Manufacturing</b> (Aylesbury, UK)	SLS	Short fiber filled nylon powder	Chopped/milled		Product sponsor for SSC Bloodhound
<b>Windform</b> (materials only) and <b>CRP Group</b> (Modena, Italy)	SLS	Polyamide (nylon) filled with short glass or carbon fiber	Chopped/milled		Satellites, manifolds, brake arms, uprights, cold duct fan,
<b>CRP Group USA</b> (Mooresville, NC)	SLS	<u>Windform</u> ** materials	Chopped/milled		<u>Stockcar</u> electrical enclosure, satellite parts

\* Fused filament fabrication (FFF) and MarkForged's proprietary composite filament fabrication (CFF) are modified forms of FDM.

\*\* Though not detailed specifically, Windform materials are described in the 3D printing industry as nylon filled with milled, very short (100µm) fibers.



## Polymer Multi-Material im AM Prozess 2: Inkjet / Polyjet Printing

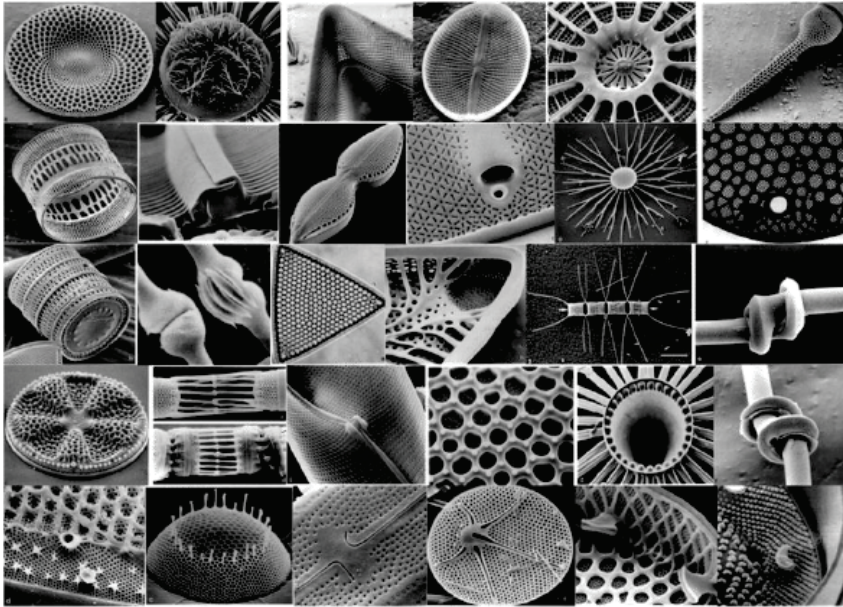


# Bionik

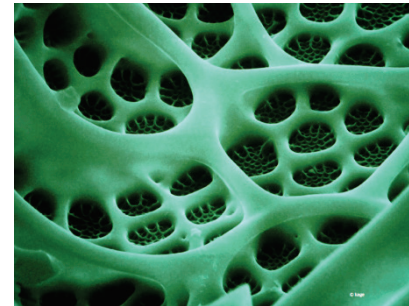
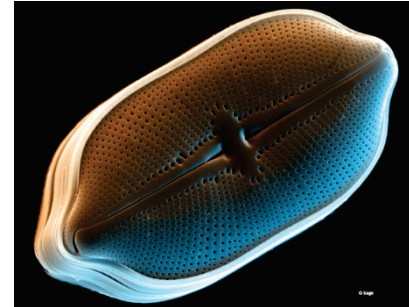
Direkte Übertragbarkeit aus natürlichen Vorbildern



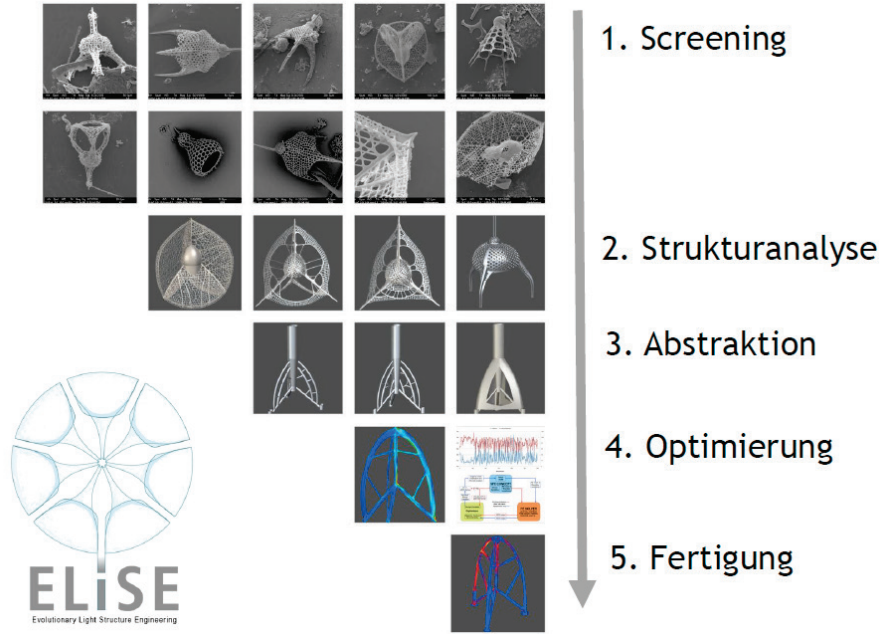
# Bionischer Leichtbau



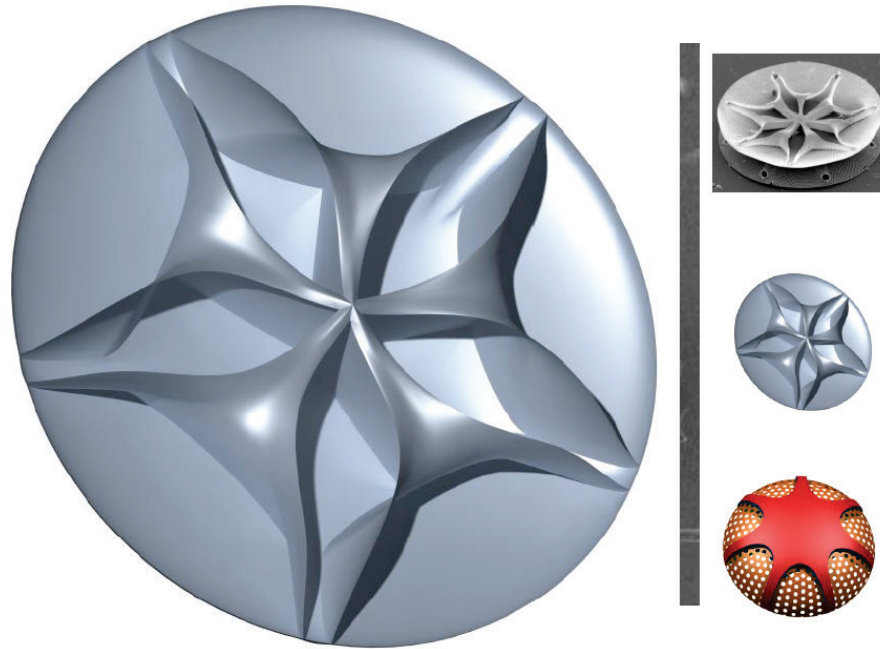
Round et al. 1990



# Bionischer Leichtbau: Evolutionary Light Structure Engineering



# Bionischer Leichtbau: Entstehung eines CAD-Modells



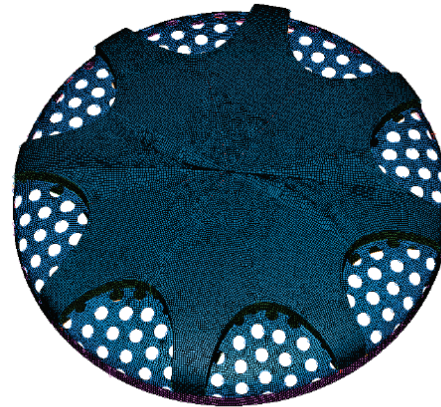
# Bionischer Leichtbau: Parametrisches CAD-Modell

- Modellvariation per Makro
- Export der einzelnen Modellsegmente



# Bionischer Leichtbau: Vernetzung

- Automatische Vernetzung mit Hypermesh Batchmesher
- Geometrie vorbereiten (zusammenfügen, säubern)



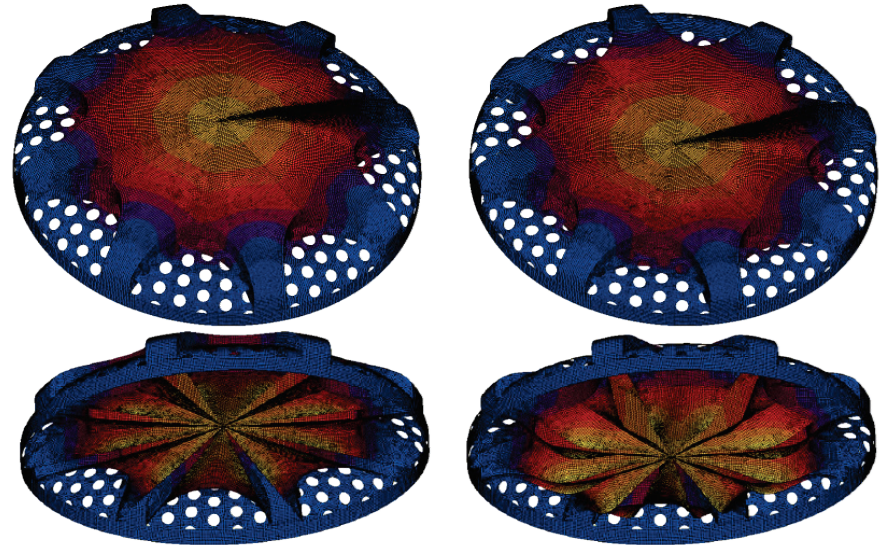
Oberseite



Unterseite

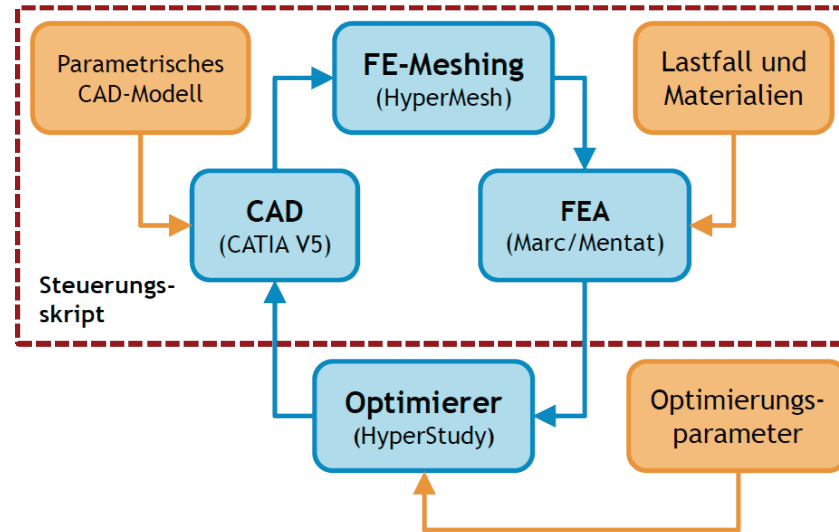
# Bionischer Leichtbau: FE-Berechnung

- FE-Berechnung mit Macr/Mentat
- Randbedingungen und Materialien zuweisen
- Zielgrößen auslesen

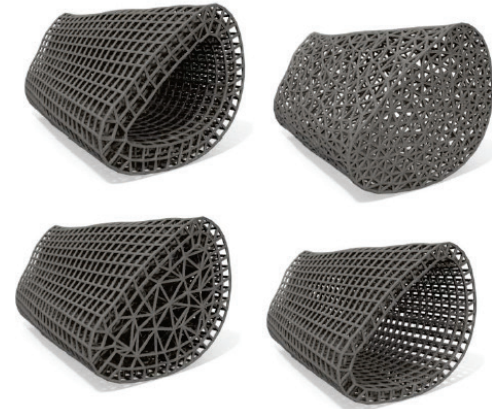


# Bionischer Leichtbau: Optimierung

- Optimierung mit HyperStudy
- ARSM Optimierung
- Zielfunktion: Minimierung der Masse
- Randbedingung: Begrenze Absenkung
- Einlesen und Bewerten von Masse und Absenkung
- Variation der Designvariablen
- Erstellung eines CATIA-Makros
- Start der nächsten Iteration

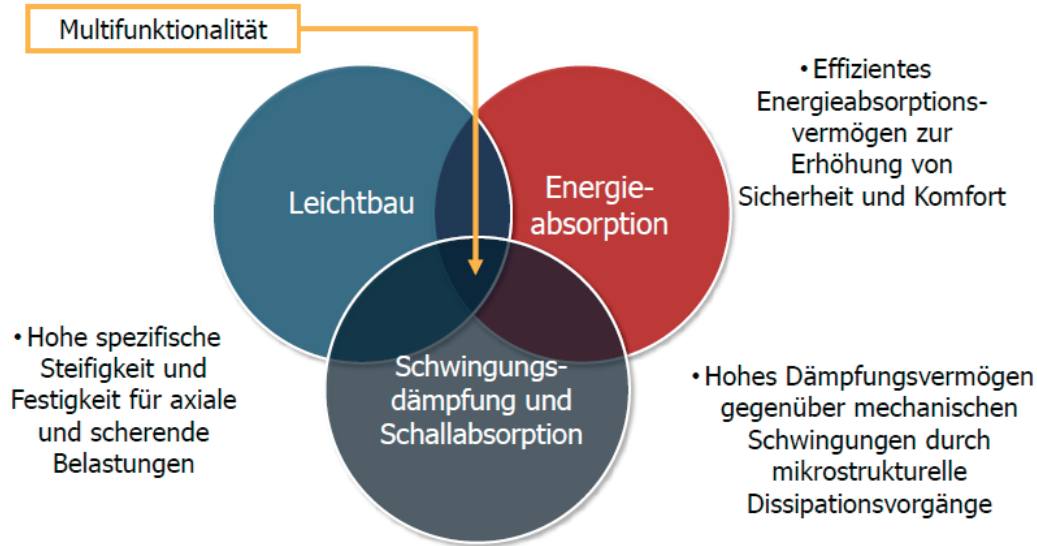


# Bionischer Leichtbau: Gitter für anatomische Anwendungen

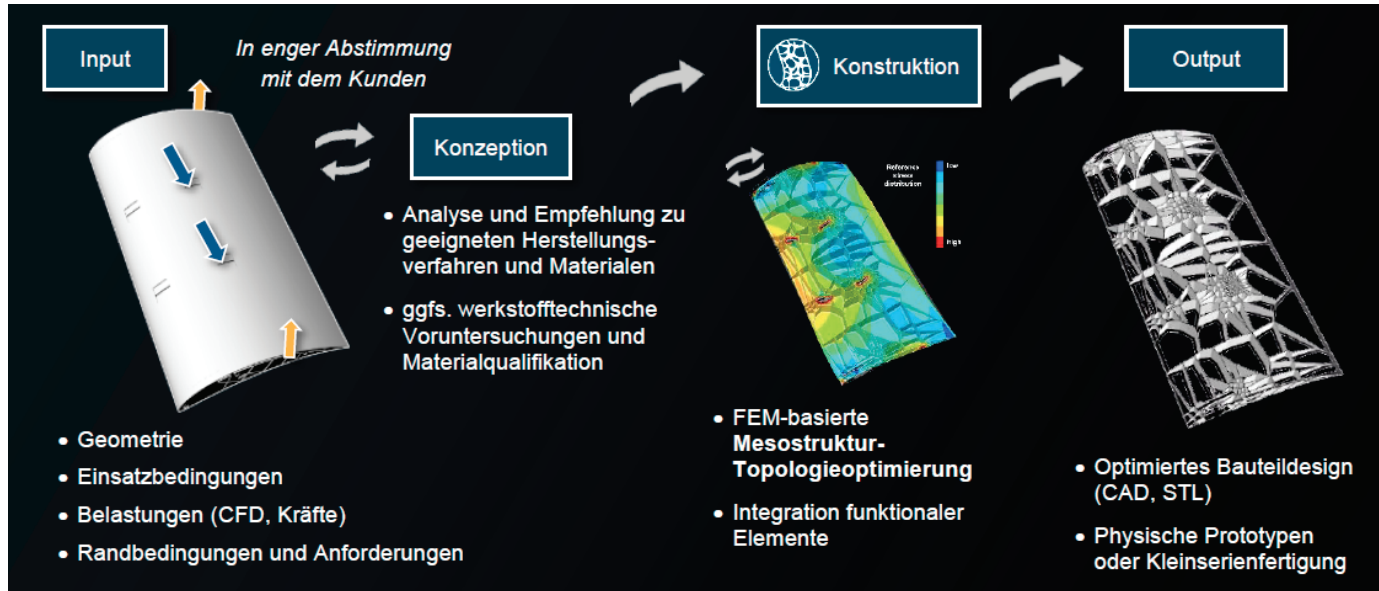


*Drahtgitterstrukturen zum STL-  
Design hinzufügen:  
Mit dem  
Modul "Lightweight Structures"*

# Zellulare Strukturen (CellCore)



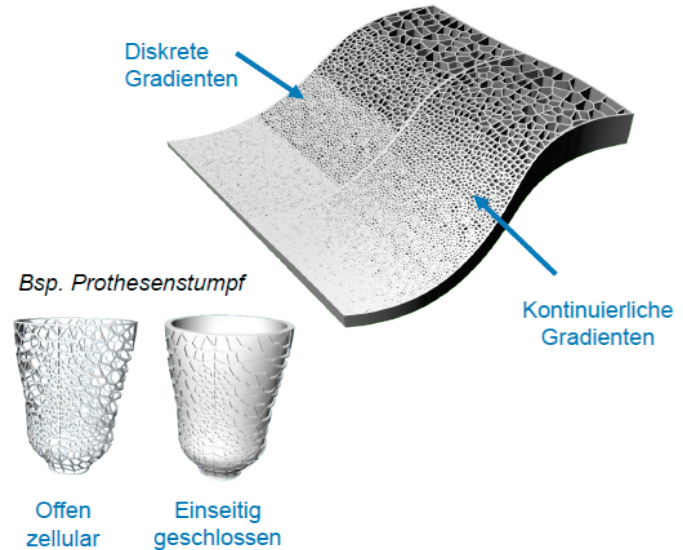
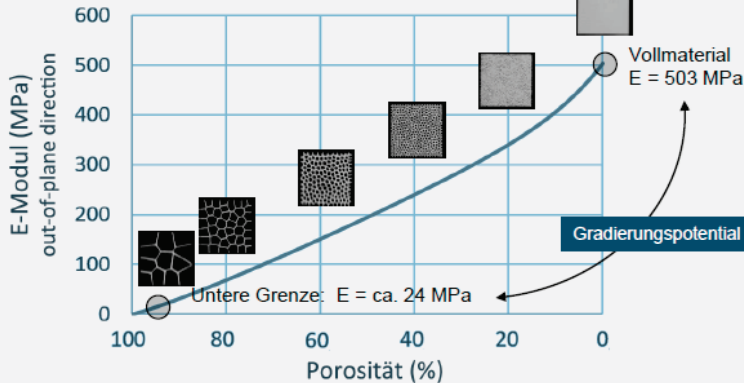
# Zellulare Strukturen (CellCore)



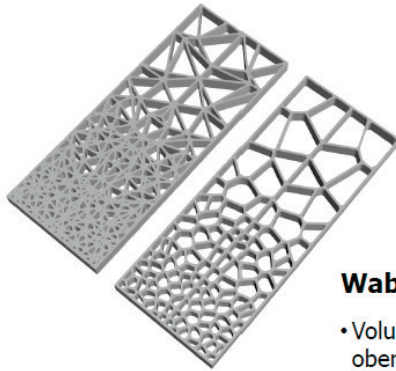
# Zellulare Strukturen (CellCore)

Durch gezielte Dichtegradierungen können Eigenschaften lokal variiert bzw. definiert eingestellt werden

Bsp. Taulman Alloy 910 (Nylon based Filamentmaterial)  
Näherungshafte Modellierung aus Angaben des Hersteller-TDS

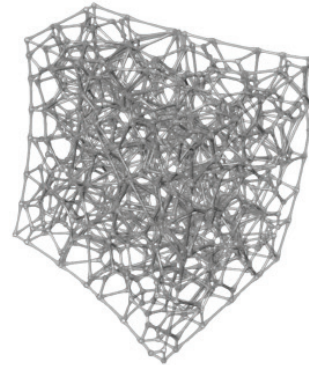


# Zellulare Strukturen (CellCore)



## Wabenkerne

- Volumen- oder oberflächenfüllend
- Stochastisch oder Einheitszellenbasiert
- Triangular oder polyedrisch



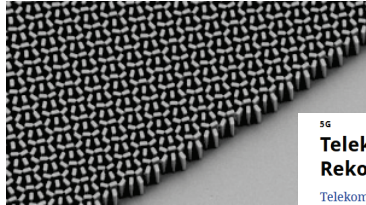
## Schäume / Lattices

- Volumenfüllend
- Stochastisch oder Einheitszellenbasiert
- Triangular oder polyedrisch

# Meta-Materialien

Auch als ‚engineered Materials‘ bekannt  
Haben Eigenschaften, die in der Natur nicht vorkommen

- Flache Linsen
- Negative Poisson-Ratio Strukturen
- Schallabsorption etc.



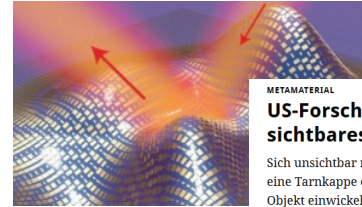
TiO2 Linse (Harvard)

5G  
**Telekom und Huawei demonstrieren Rekord-Datenübertragung**

Telekom und Huawei haben heute in Bonn 70 GBit/s im Mobilfunk übertragen. Mit Focal-Array-Technologie, die sich auch auf Metamaterialien stützt, seien Bleistift-förmige Richtstrahlen zwischen der Antennengruppe und den Geräten der Kunden erzeugt worden.

Die Deutsche Telekom und Huawei haben am 17. Februar 2016 in Bonn bei einer 5G-Demonstration einen Übertragungsrekord erzielt. Beim Live-Versuch mit

Golem Pressemeldung



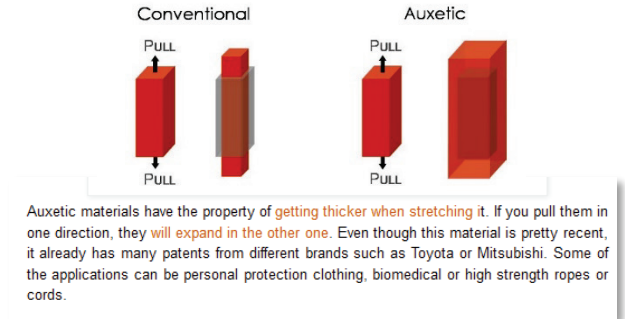
Gold Antenne (Berkeley)

**METAMATERIAL**  
**US-Forscher entwickeln Tarnkappe für sichtbares Licht**

Sich unsichtbar machen, einfach verschwinden: US-Forscher haben eine Tarnkappe entwickelt, in die sich ein beliebiges dreidimensionales Objekt einwickeln lässt. Vorausgesetzt, es ist klein genug.

Ein Metamaterial, das Gegenstände im sichtbaren Licht verschwinden lässt, haben Forscher der Universität von Kalifornien in Berkeley entwickelt. Die Objekte, die die Tarnkappe unsichtbar macht, können eine beliebige Form haben.

Golem Pressemeldung



# Meta-Materialien: mechanische Meta-Materialien

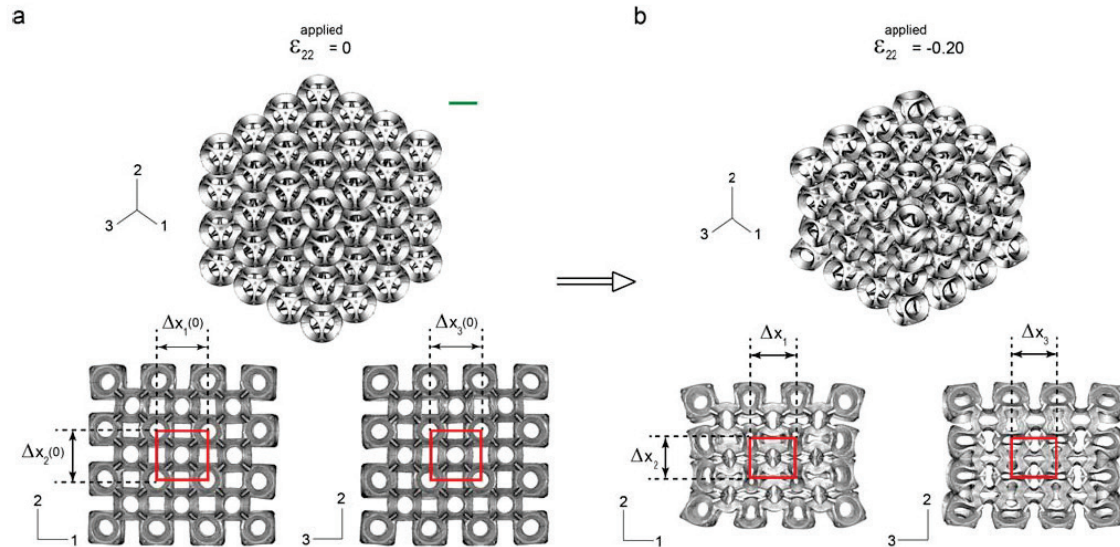
Henry Moseley X-Ray Imaging Facility

MANCHESTER  
1824

Auxetic and Non-Auxetic Behaviour

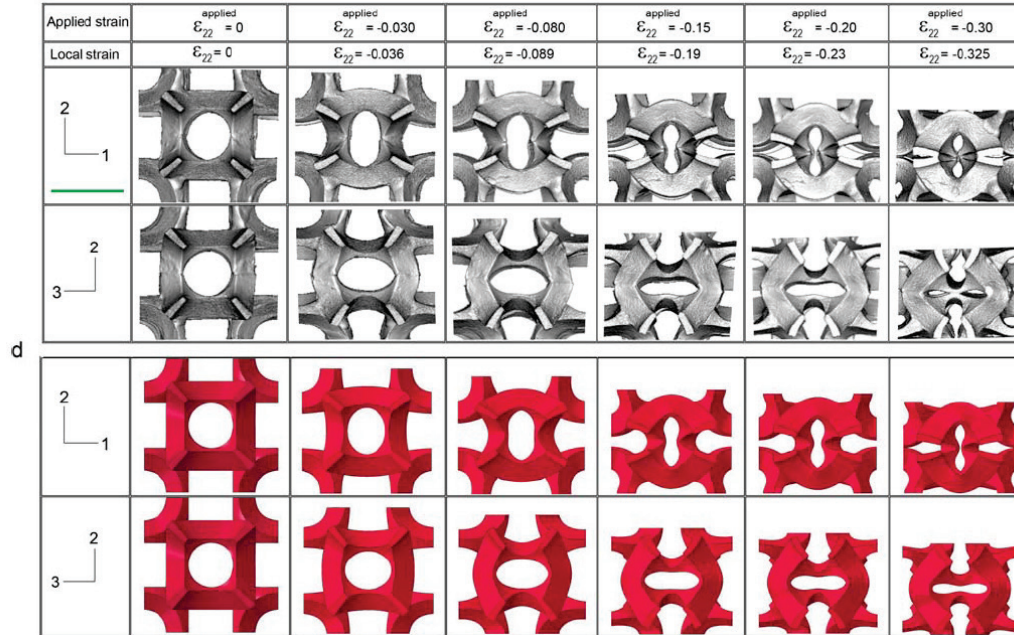
# Meta-Materialien: mechanische Meta-Materialien

- Auch Auxetic materials genannt
- Ziehen sich unter Druck zusammen bzw. expandieren unter Zug



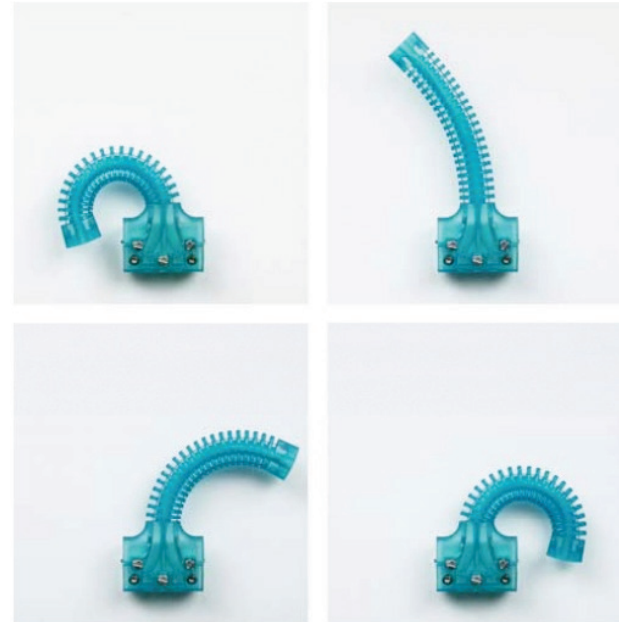
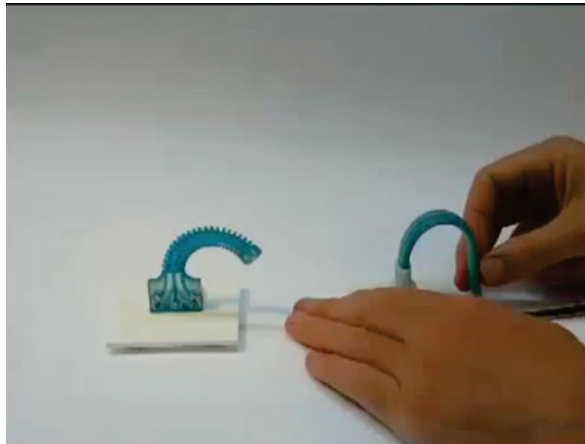
# Meta-Materialien: mechanische Meta-Materialien

Wie fertigen? -> AM!



# Funktionsintegrierte Leichtbaukomponenten

- FGL (Nitinol, Polymer [pH-aktiviert])
- Faserverstärktes FDM (endlos oder quer zur Schicht)
- 3DP mit intelligenten Tinten (Graphen, CNT, Silber [antibakteriell])

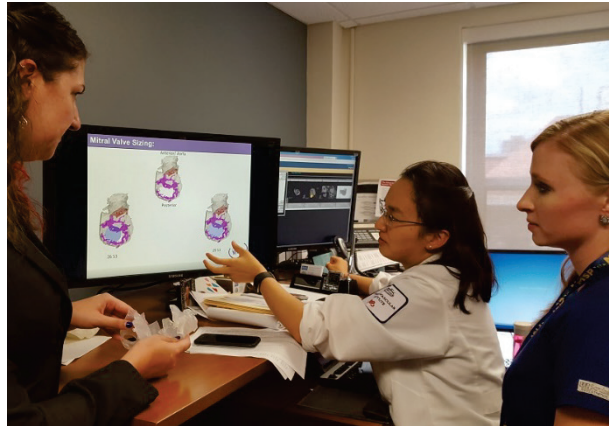
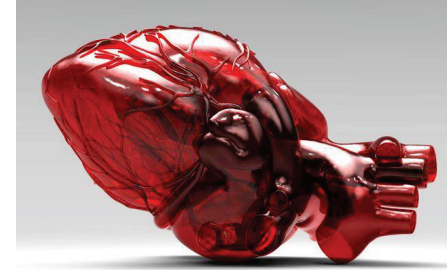




# Anwendungen in der Medizintechnik

# Modelle von Organen

- OP Planung (Bild unten: Herzklappenplanung)
- Lehre
- Verständnis



# Operationszubehör

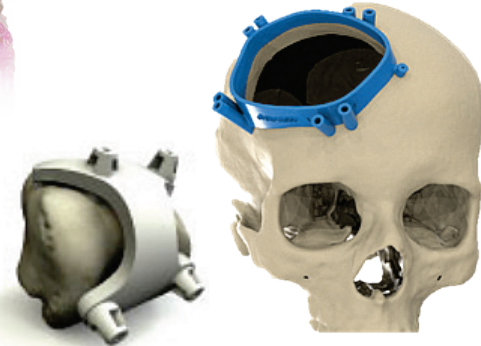
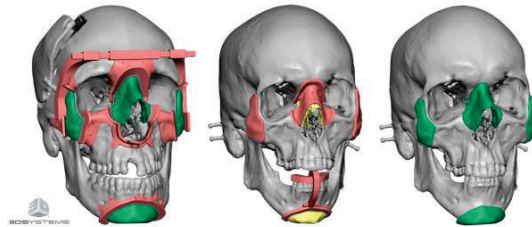
## Patientenspezifische Instrumente

- Atemmaske (flexibles Material)
- Messer (Austausch Hüftpfanne)
- Vorrichtungen (Hirnschirurgie, Wirbelsäule, Greifer, Haltevorrichtungen)

## Arztspezifische Instrumente

- Griffe

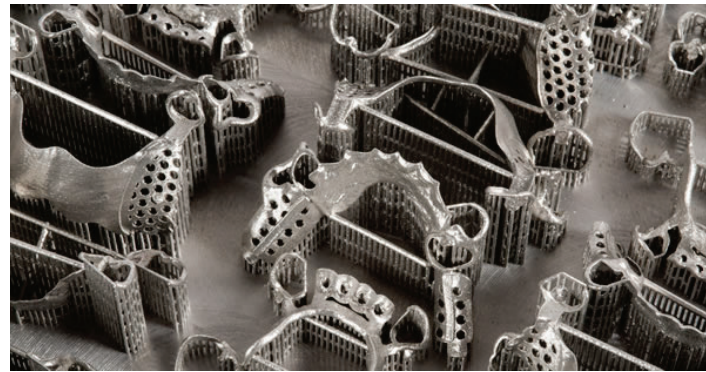
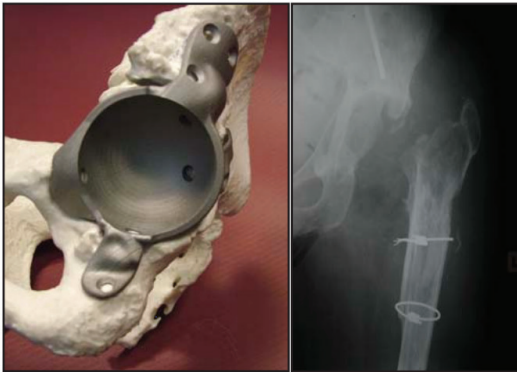
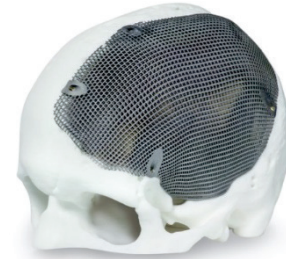
## Patientenspezifische Stützen



# Implantate

## Patientenspezifische Implantate

- Metall (Schäfte, Knochen, Dental-, Platten, Schrauben)
- Keramik (Knochenführung, Knochen?)
- Knorpel



# Prothesen

Patientenspezifische Prothesen und Orthesen

- Kunststoff (Schiene, Gliedmaßen,...)
- Integrierte Funktionalität (Aktoren/Sensoren am Beispiel Hand,...)



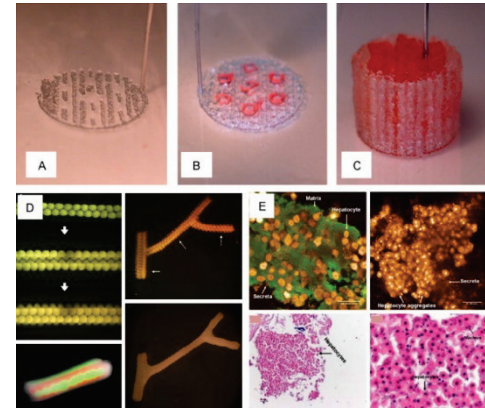
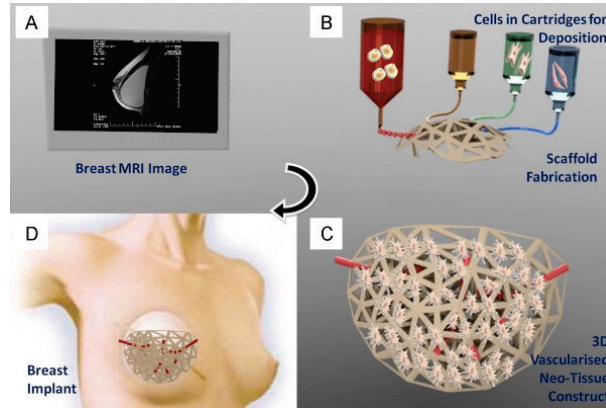
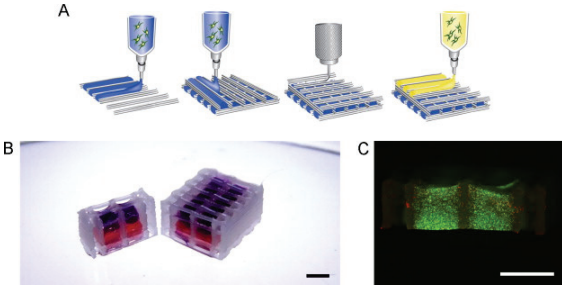
# Zellen

- Haut für Laborversuche
- Haut für Operation/Transplantation
- Stammzellen



# Organe

- Knorpel
- Schichten der Haut
- Muskel
- Adern
- Funktionsfähige „aktive“ Organe (ETHIK!)

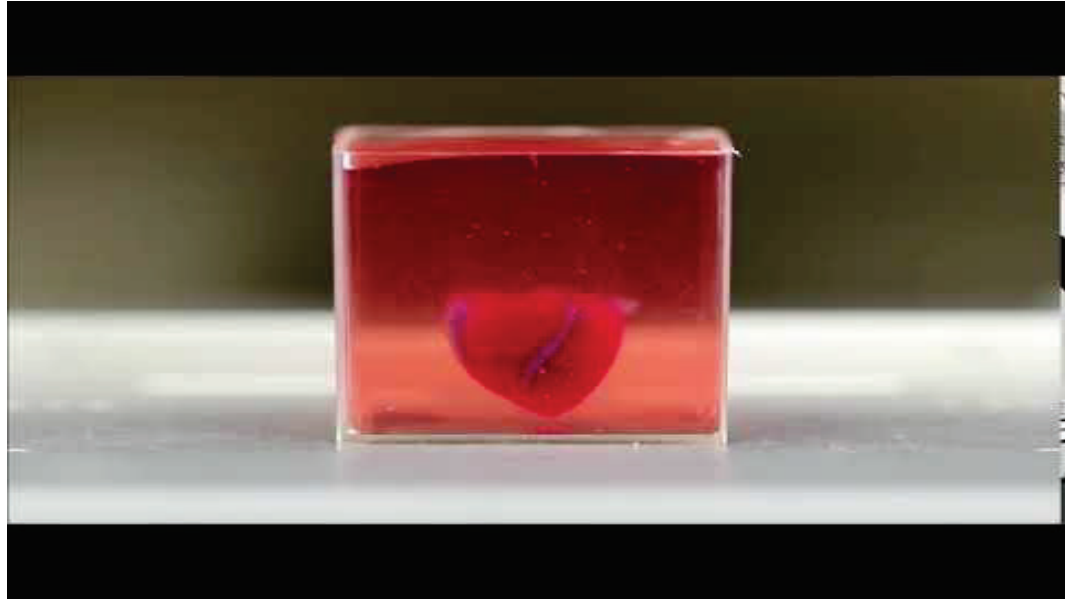
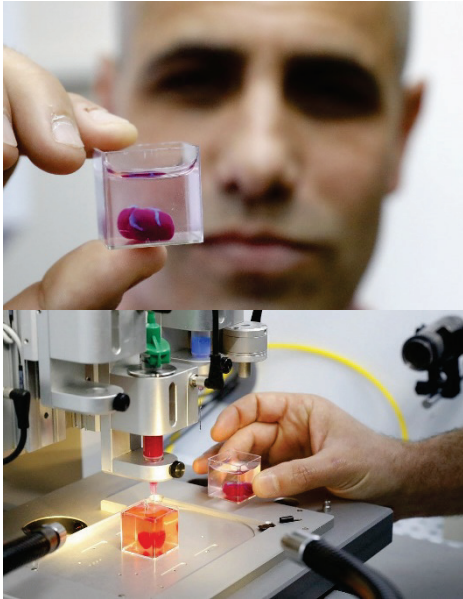


# Organe



# AM Herz aus Patientenzellen

- TAU 2019





# Neue Konstruktionsansätze: Herausforderungen

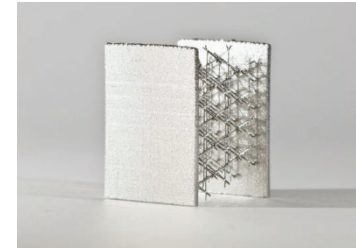
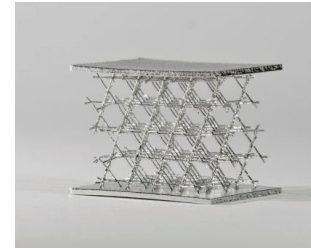


# Form follows function: neue Konstruktionsansätze notwendig



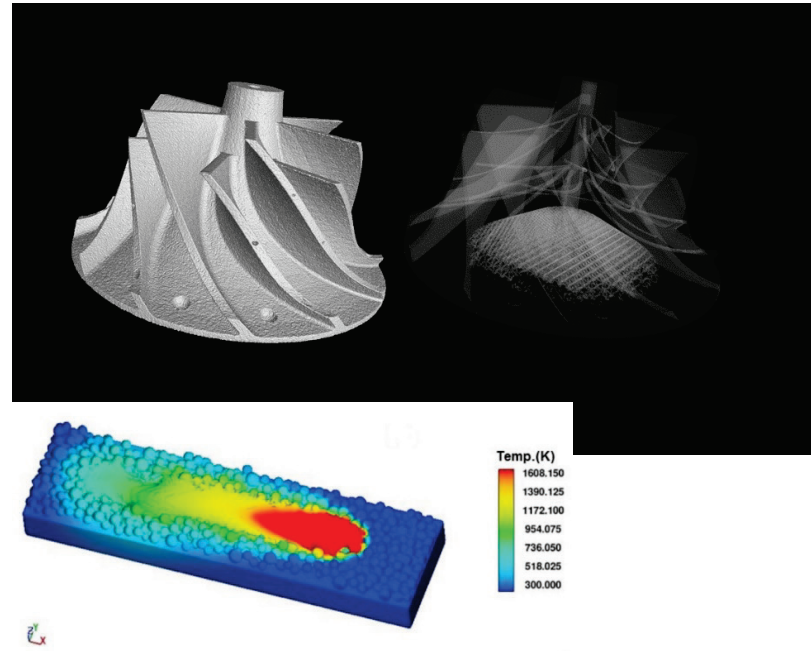
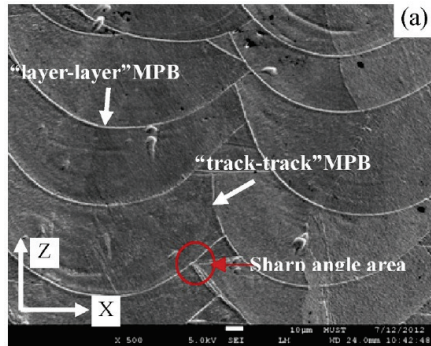
# Einfluss der Oberfläche: Verfahren und Standards!

- Tatsächliche Zielgröße undefiniert
- Raue Oberfläche bei vielen Verfahren
- Welligkeit / kinematische Rauheit in Z
- Integration in TopOpt fehlt bislang
- Zugänglichkeit für Finish-Verfahren
  - PeP
  - Gleitschleifen



# Qualitätssicherung!

- Prüfen auf Poren
- Gefügeanalyse
- **Reproduzierbarkeit**
- Prozessstabilität

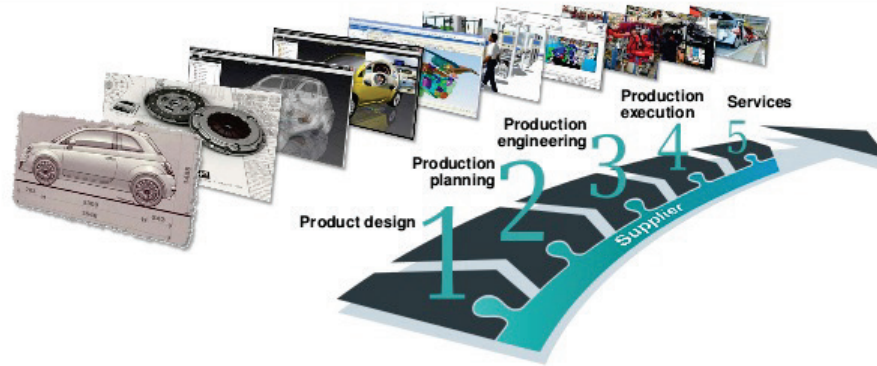


# CAM Integration essentiell

- Prozesskettenintegration notwendig: additive und subtraktive Prozesse auslegen und verknüpfen
- Erste Ansätze existieren

Only a holistic approach improving all processes along the entire value-added chain will fulfill the targets

SIEMENS



© Siemens AG 2016

# Prozesskette und Umsetzung in der Produktion neu zu denken

- Verbindung von AM und Post-Processing Technologien
- Qualitätssicherung
- Automatisierung
- Digital hubs?



# Zusammenfassung

Konstruktion muss Zielstellung und Randbedingungen **vereinbaren**

Kenntnis des

- **Additiven Fertigungsprozesses** und der
- gesamten **Prozesskette** genauso wie des
- **Materials** zwingend notwendig

Enge **Interaktion** mit Designer und Anwender erforderlich

Software- als auch Hardware-Tools entwickeln sich stetig weiter -> **kontinuierlicher Lernprozess**



Design für die Additive Fertigung

# Design für die Additive Fertigung 2021 - 08

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

