

# FERTIGUNGSTECHNIK 05

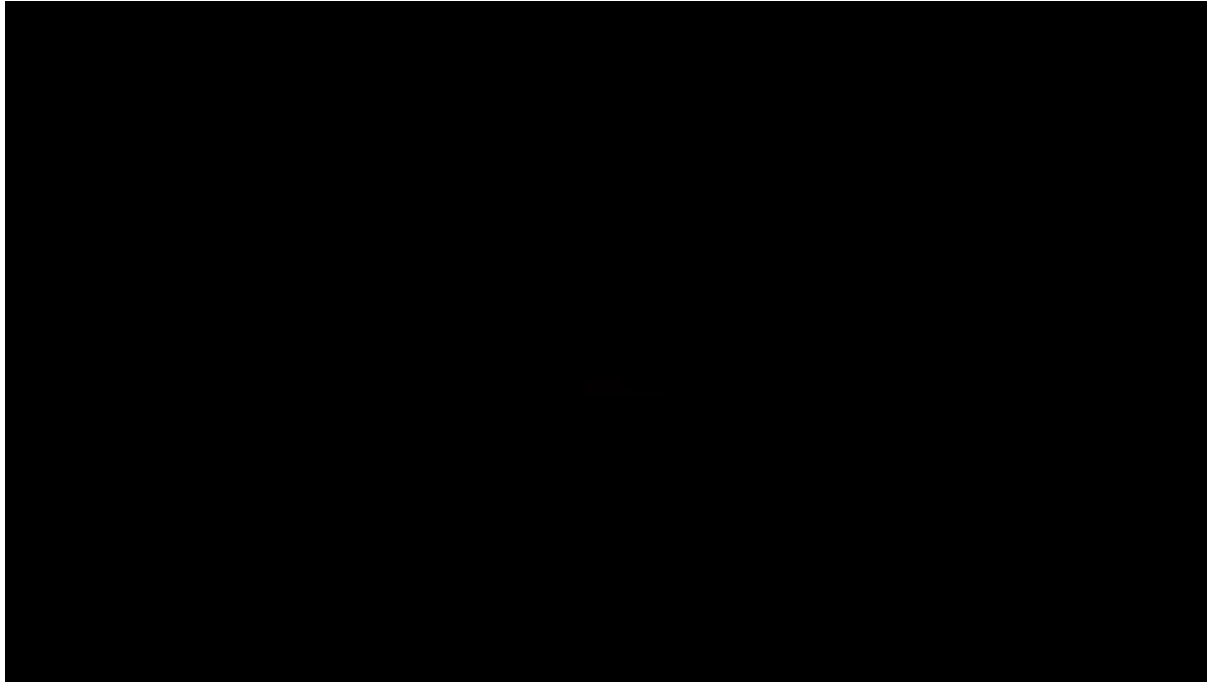


Wintersemester 2020/21

# GLIEDERUNG DER VORLESUNG

1	Einführung: Grundlagen der Fertigungstechnik		
2	Die verschiedenen Fertigungsverfahren		
2.1	Urformen (Gießen, Additiv, ...)	2.4	Fügen (Schweißen, Löten, ...)
2.2	Umformen (Massiv-, Blech-, ...)	2.5	Beschichten
2.3	Trennen (Drehen, Fräsen, ...)	2.6	Stoffeigenschaft ändern
3	Messen in der Fertigung		
4	Prüfungsvorbereitung		

# ADDITIVE FERTIGUNG



## 2.1 Urformen

# ADDITIVE FERTIGUNG – DEFINITION (VDI3405)

„Bei additiven Fertigungsverfahren erfolgt die **Fertigung** nicht materialabtragend aus einem massiven Körper wie beim Fräsen, sondern **materialzufügend**, also additiv.

Das heißt, **die Bauteile entstehen schichtweise** durch Hinzufügen von Ausgangsmaterial oder durch Phasenübergang eines Materials vom flüssigen oder pulverförmigen in den festen Zustand.

Die Fertigung erfolgt **ohne Verwendung von Formen und Werkzeugen.**“

# HERAUSFORDERUNGEN

Zielstellung: funktionales Bauteil

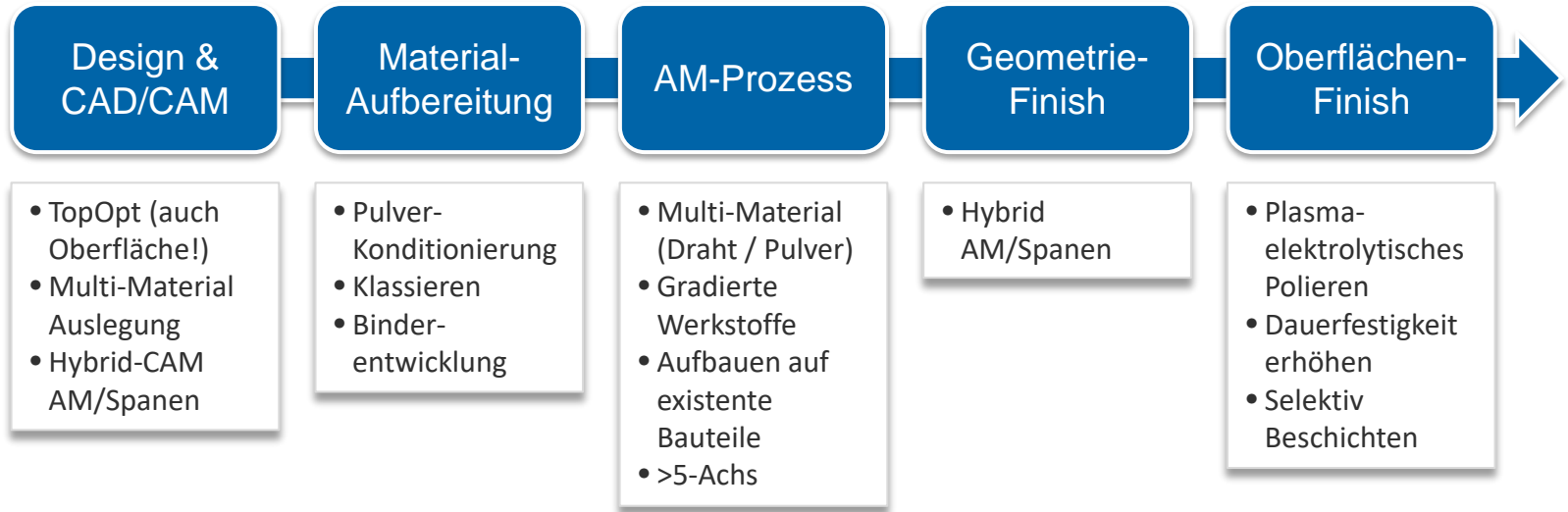
1. Eigenschaften **kennen**
2. Eigenschaften gezielt **einstellen**
3. Optimal **fertigen**

Voraussetzung: Verständnis

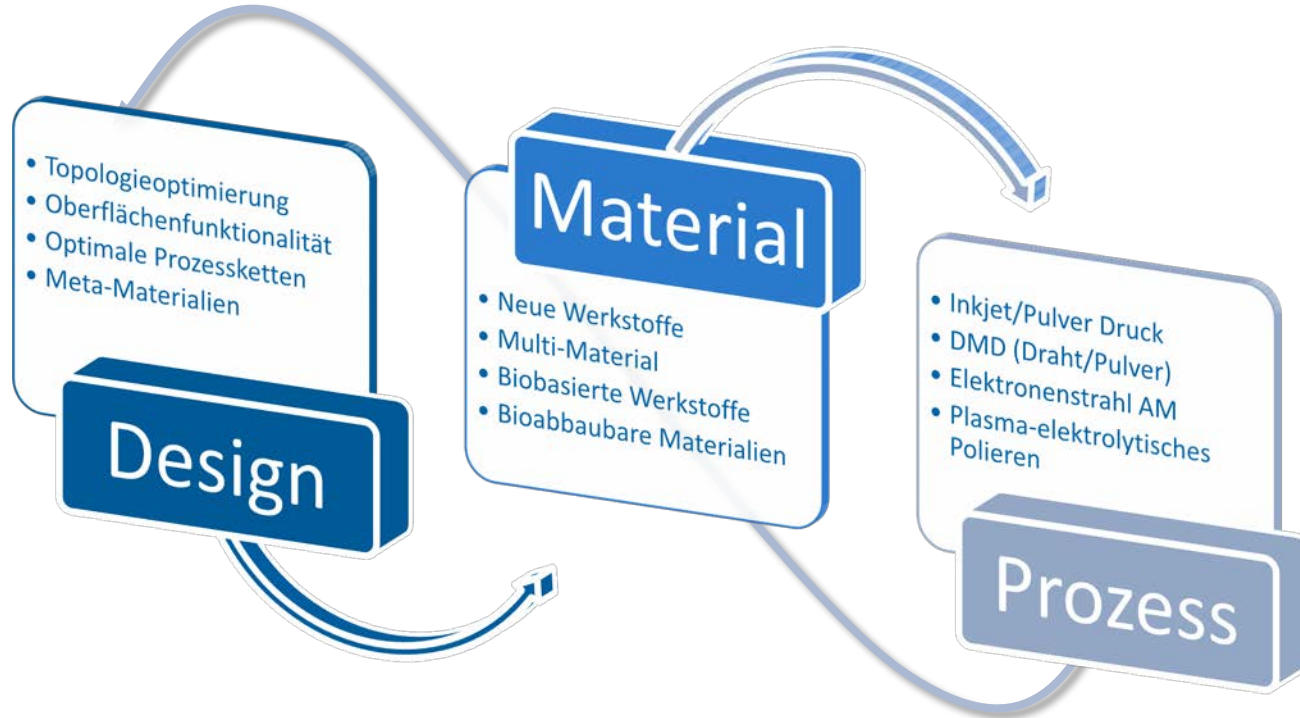
- Material
- Prozess
- Prozesskette

## 2.1 Urformen

# PROZESSKETTE



# ADDITIVE FERTIGUNG



# EXKURS: „3D DRUCK“ ≠ 3D DRUCK

Stereolithographie

Laser-Strahlschmelzen

Elektronen-Strahlschmelzen

Multi-Jet Modeling

Poly-Jet Modeling

Wire Arc Additive Manufacturing

Digital Light Processing

Laser Pulver Auftragschweißen

Laser-Sintern

### Fused Filament Fabrication



[Ultimaker]

### 3D-Drucken



[Z-Corporation]

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# SYSTEMATIK DER ADDITIVEN FERTIGUNGSVERFAHREN

### **Besondere Kennzeichen der additiven Fertigungsverfahren:**

- es ist kein Einsatz von produktspezifischen Werkzeugen/Formen erforderlich
- die Generierung der Schichtgeometrie erfolgt direkt aus den 3D-CAD-Daten
- die Datensätze können prinzipiell in jeder beliebigen Orientierung gebaut werden (Entfall der Spannproblematik im Bauprozess)

Zudem können alle heute auf dem Markt befindlichen Maschinen grundsätzlich mit dem gleichen (STL)-Datensatz angesteuert werden.

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# INDUSTRIELLER EINSATZ

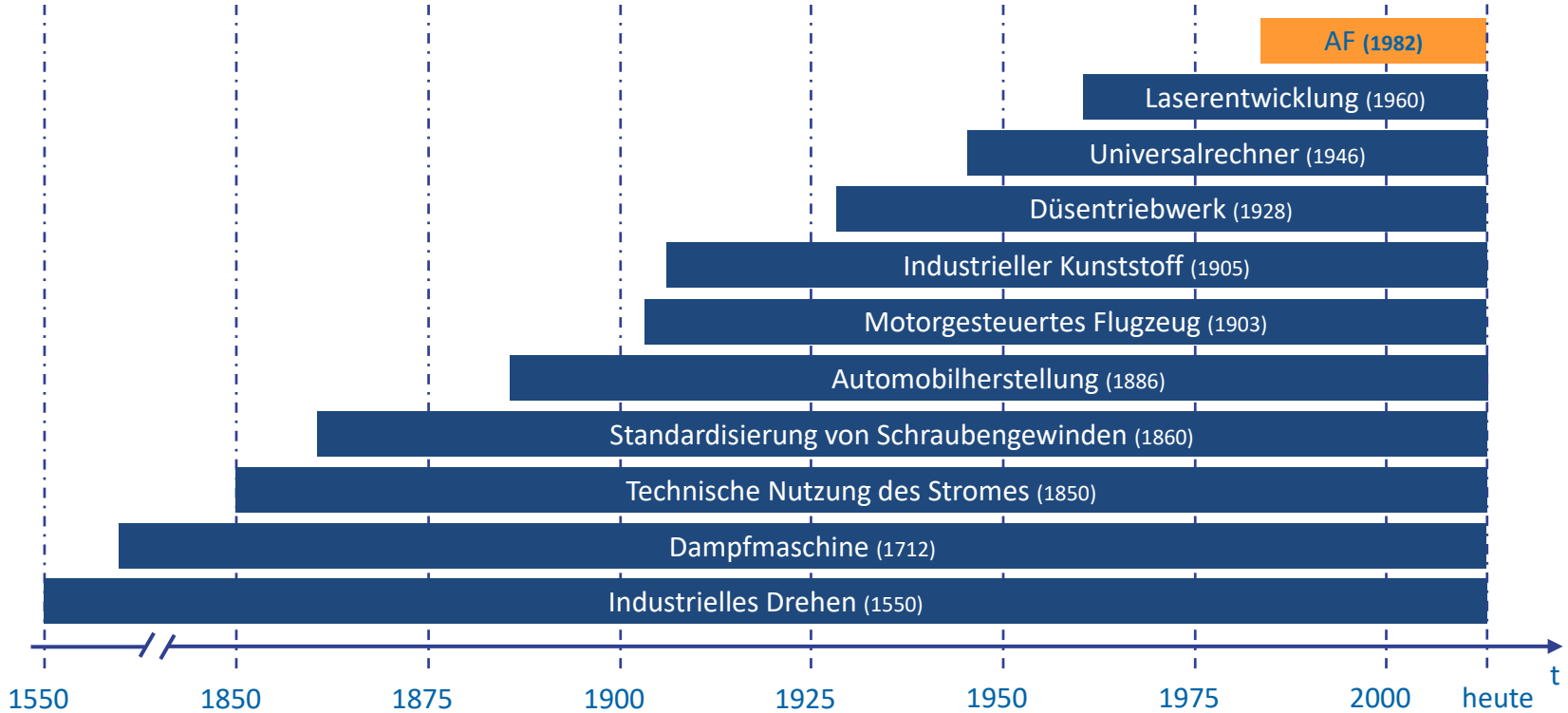
### Typische Einsatzgebiete:

- Kleine Stückzahlen und/oder kundenspezifisch angepasste Produkte
- Komplexe Bauteile und Konstruktionen, die so nicht anders zu fertigen sind (Leichtbau, Funktionsintegration...)
- Verkürzung der Iterationszyklen bei der Produktentwicklung
- Fertigung nach Bedarf, z.B. Fertigung von Ersatzteilen (z.B. für ältere Serienprodukte oder Überbrückungen)
- Fertigung am Ort des Bedarfs bei zentraler Konstruktion



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

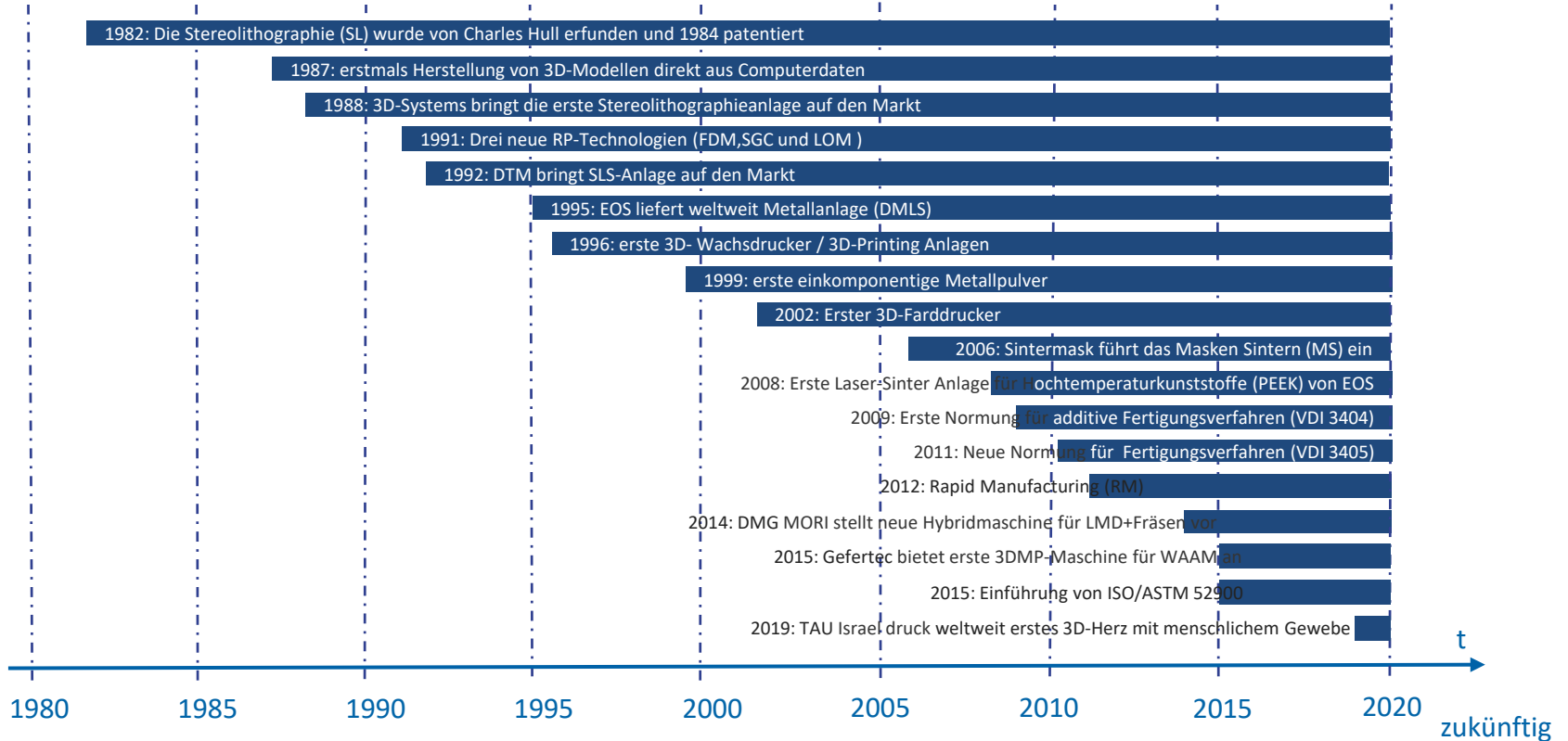
# ZEITLICHE EINORDNUNG DER ADDITIVEN FERTIGUNG



Quellen: Universität Duisburg / Essen

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

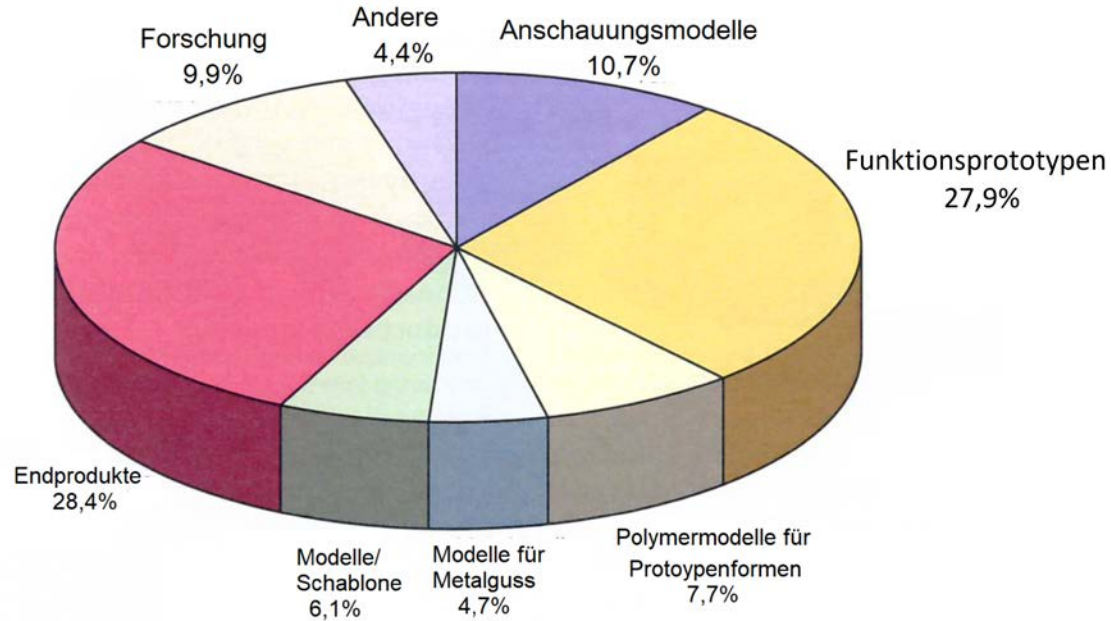
# ZEITLICHE ENTWICKLUNG DER ADDITIVEN TECHNOLOGIEN



2.1 Urformen – Additive Fertigung

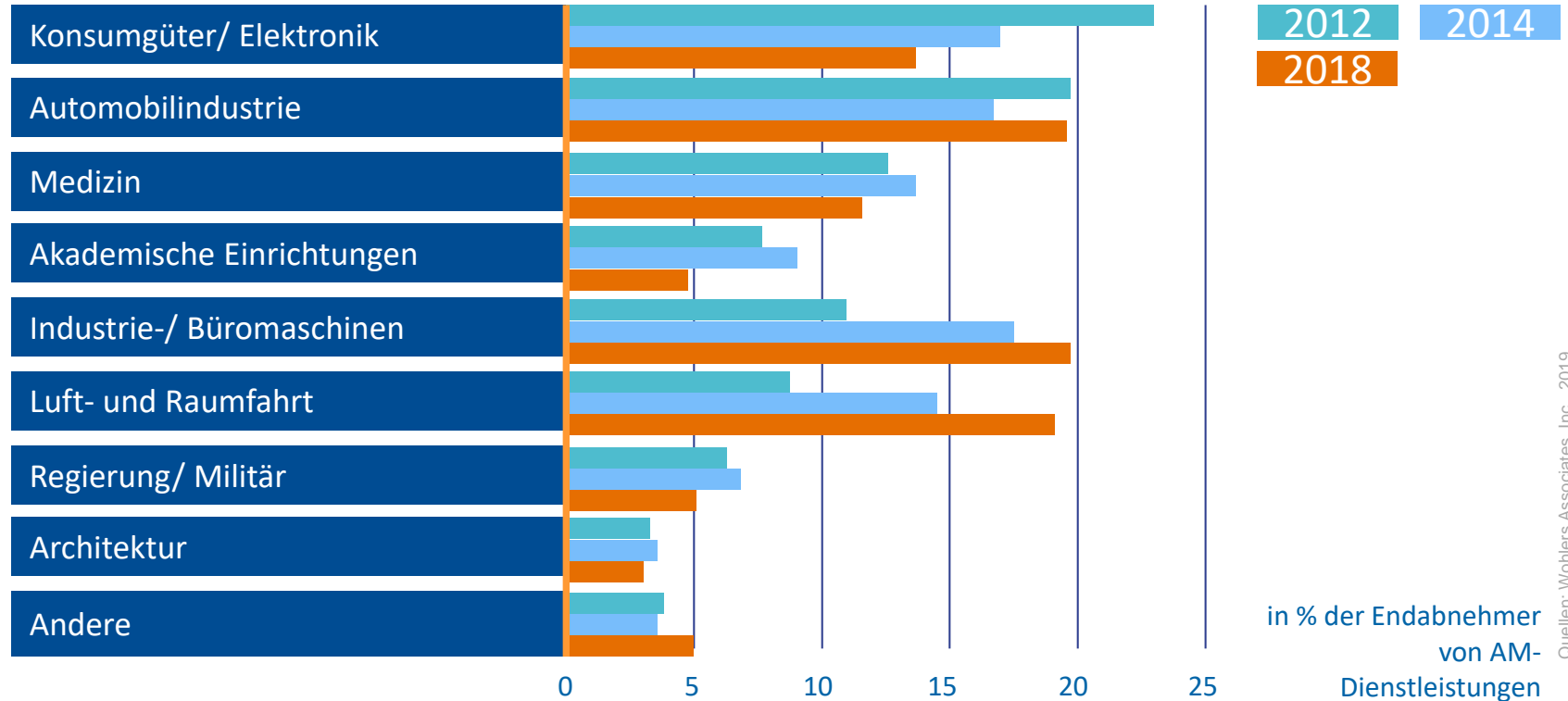
# ANWENDUNGSGEBIETE IN DER INDUSTRIE

2018



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# BRANCHEN DER ADDITIVEN FERTIGUNGSTECHNIK



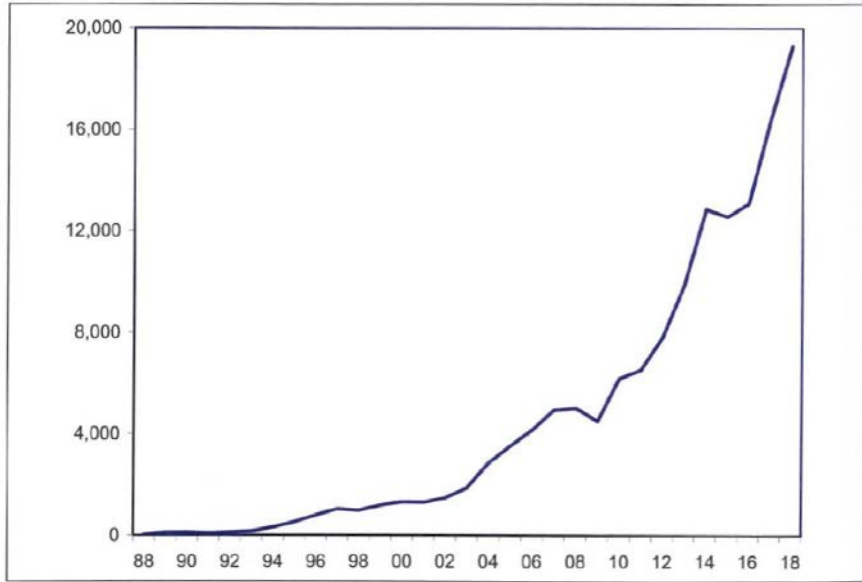
Quellen: Wohlers Associates, Inc., 2019

in % der Endabnehmer  
von AM-  
Dienstleistungen

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

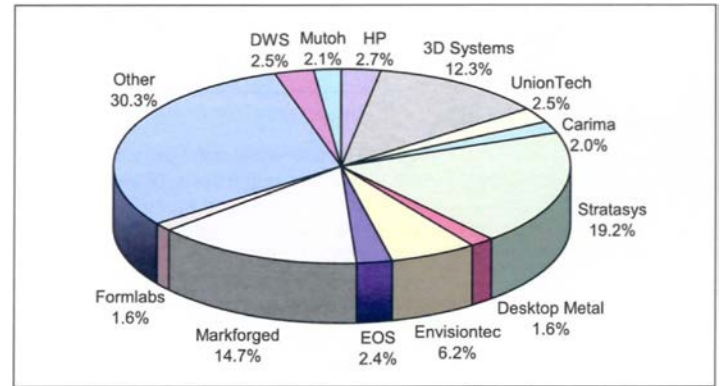
# WELTWEITER VERKAUF VON INDUSTRIELLEN AM-SYSTEMEN (2018)

Markt verändert sich rasant;  
nur Momentaufnahme!



Source: Wohlers Associates, Inc.

### Anlagenverkäufe nach Firmen:

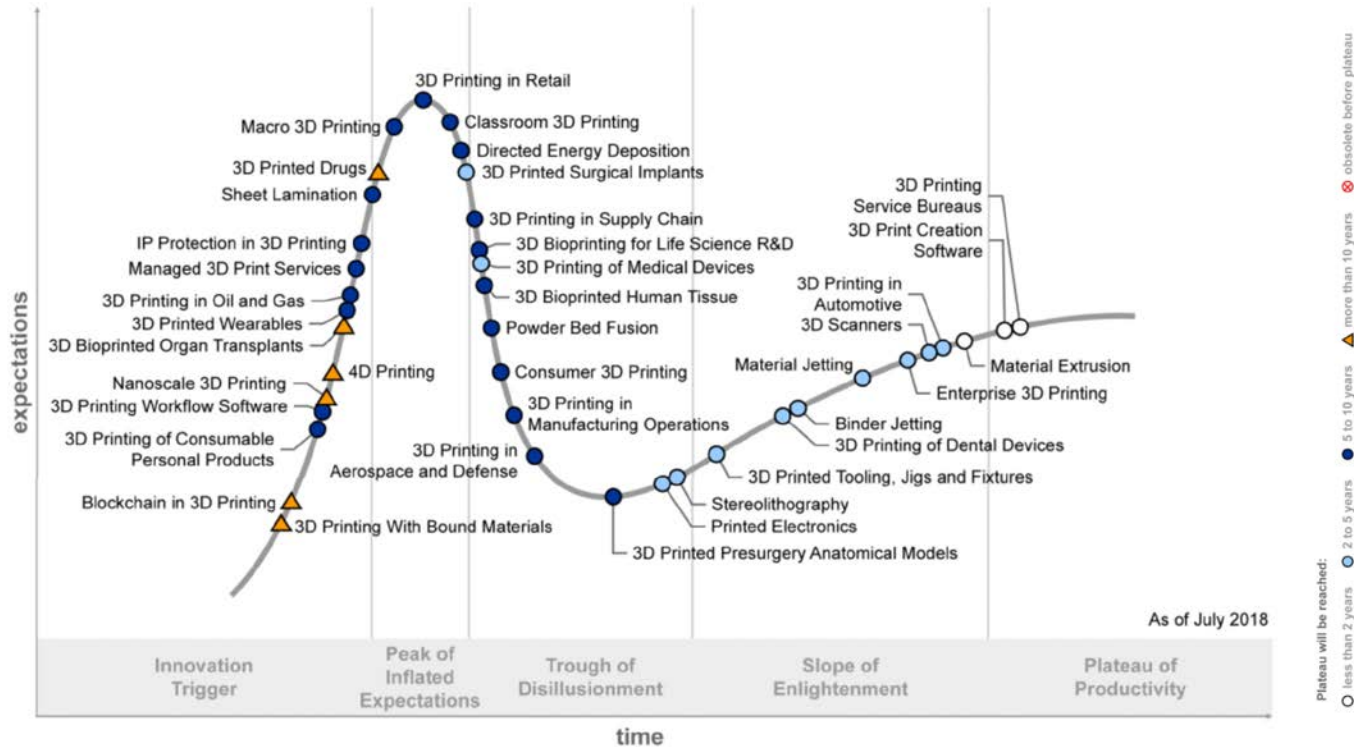


Source: Wohlers Associates, Inc.

Quellen: Wohlers Associates, 2019

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# MARKTANALYSEN – GARTNER HYPE CYCLE 2018



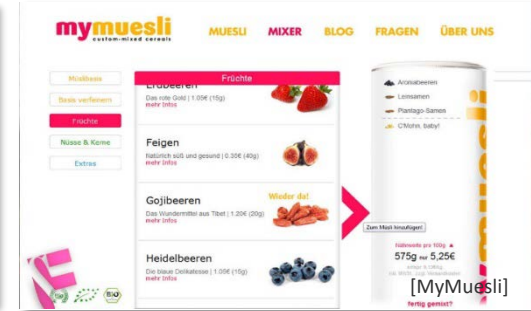
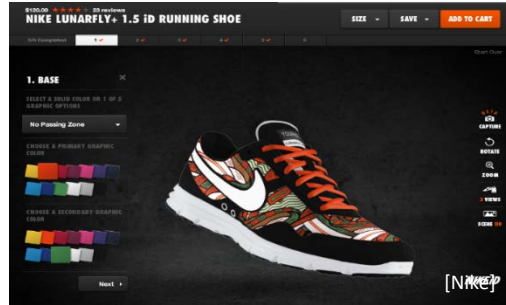
Quellen: Gartner research

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# AKTUELL: TREND VOM CONSUMER ZUM PROSUMER

### Wunsch nach Individualisierung

- „mass customisation“ und als Folge Stückzahl 1
- Additive Fertigung bietet durch werkzeuglose Fertigung großes Potential
- Herausforderung: STL-Daten und AM-Prozess müssen erzeugt/angepasst werden



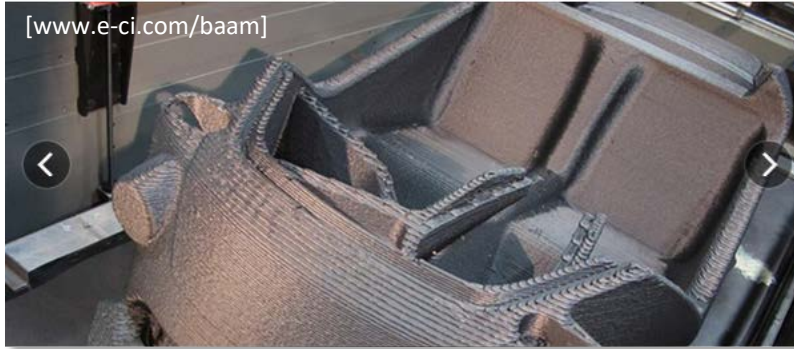
## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# ANWENDUNG MODE?



2.1 Urformen – Additive Fertigung

# ANWENDUNG AUTOMOTIVE?



# (ANWENDUNG AUTOMOTIVE)

- Lastoptimiertes Leichtbaudesign und Funktionsintegration



Bremsattel



Sitzhalterung



Light Hinge für Motorhaube

2.1 Urformen – Additive Fertigung

# ANWENDUNG NAHRUNGSMITTEL?



www.uni-due.de/fertigungstechnik

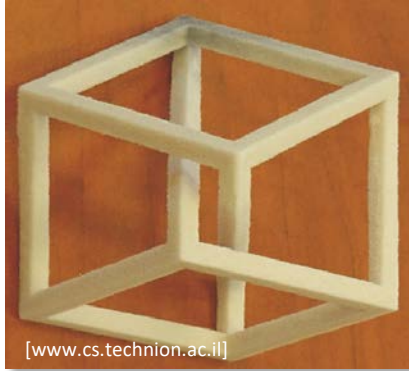


## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# ANWENDUNG KUNST?



[www.cs.technion.ac.il]



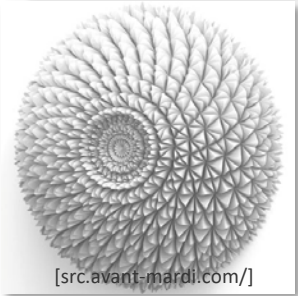
[www.cs.technion.ac.il]



[static1.schoener-wohnen.de/]



[www.rapidtech.de]



[src.avant-mardi.com/]



[www.southernguild.co.za]



[www.hat.mmu.ac.uk]



[www.freedomofcreation.com]



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

**RESTAURATION**

[3druck.com]

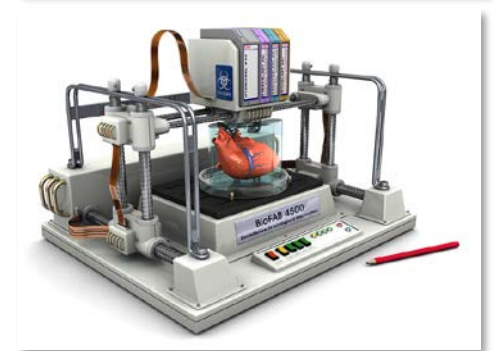
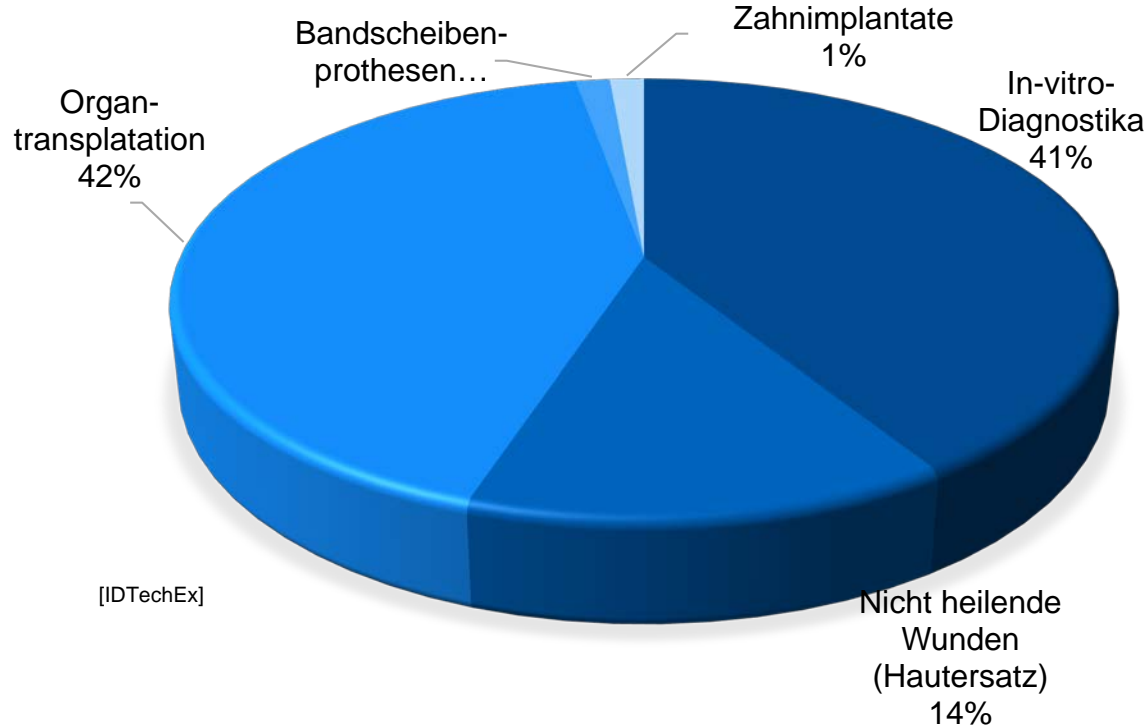
## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# GOLDSCHMIED → SCHMUCKDESIGNER?



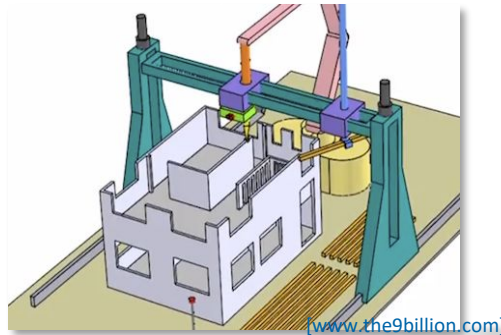
## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# ANWENDUNG MEDIZIN?



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# ANWENDUNG BAUINDUSTRIE?



# KLASSIFIZIERUNG - ÜBERBLICK

- 1. Unterteilung der additiven Fertigungsverfahren**
  1. *Rapid Prototyping*
  2. *Rapid Tooling*
  3. *Rapid Manufacturing*
- 2. Unterteilung nach Prozessketten**
  1. *Direkte Prozesse*
  2. *Direkte (mehrstufige) Prozesse*
  3. *Indirekte Prozesse*
- 3. Einteilung / Klassifizierung**
  1. *Einteilung nach VDI 3405*
  2. *Einteilung nach physikalischen Verfahren*
  3. *Einteilung nach Materialzustand*
- 4. Verfahrensablauf**

# UNTERTEILUNG DER AM

## Anforderungsabhängige Einteilung der AM

### Rapid Prototyping



### Rapid Tooling

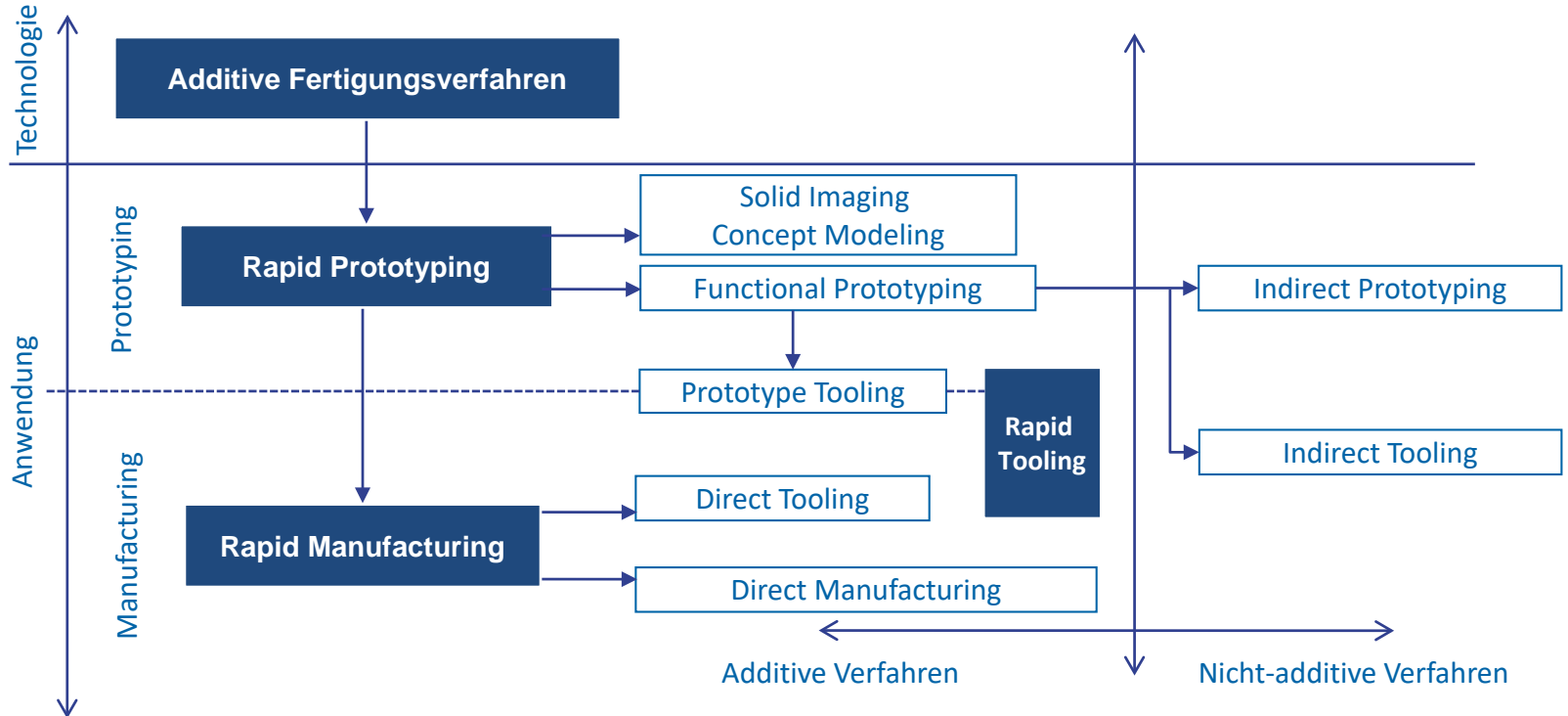


### Rapid Manufacturing



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# UNTERTEILUNG DER ADDITIVEN FERTIGUNGSVERFAHREN



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# RAPID PROTOTYPING

Rapid Prototyping bezeichnet die Anwendung der Technologie der additiven Fertigungsverfahren zur Herstellung von **Modellen** und Prototypen, also von physischen Bauteilen ohne Produktcharakter.

- Additive Herstellung von Bauteilen mit eingeschränkter Funktionalität (Prototypen, Versuchsteile)
- Eigenschaften: ausgewählte Merkmale, z. B. Geometrie oder Haptik
- Material kann, muss aber nicht Serienmaterial sein
- Konstruktion kann, muss aber nicht fertigungsgerecht im Sinne der Serienfertigung sein

Kupplungsprototyp



Architekturmodell

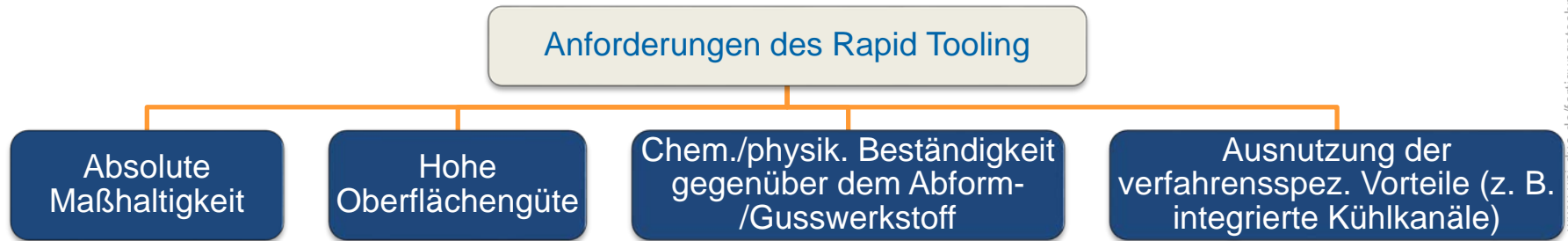


## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# RAPID TOOLING

Rapid Tooling bezeichnet die additive Herstellung von Werkzeugeinsätzen, **Werkzeugen**, Lehren und Formen.

- Schnelle Produktbereitstellung
- Kurze Entwicklungszeiten der Werkzeuge
- Gut geeignete Alternative zum herkömmlichen Werkzeugbau
- Geeignet für kleine und mittelgroße Produktserien
- Möglichkeit Kühlkanäle zu integrieren



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# RAPID MANUFACTURING

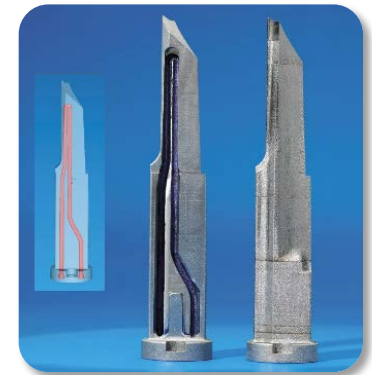
Rapid Manufacturing bezeichnet die wirtschaftliche Herstellung von **Endprodukten** mittels additiven Fertigungsverfahren. Darunter fallen sowohl Positive als Einzelstücke oder in Kleinserien als auch Negative wie z. B. Gussformen oder Werkzeugeinsätze.

- Additive Herstellung von Endprodukten (häufig auch als Serienteile bezeichnet)
- Eigenschaften: Weist alle Merkmale des Endproduktes auf oder wird vom Kunden für den „Serieneinsatz“ akzeptiert
- Material ist identisch mit dem des Endprodukts
- Konstruktion entspricht der des Endprodukts

Titanimplantat



Konturnah gekühltes Bauteil



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

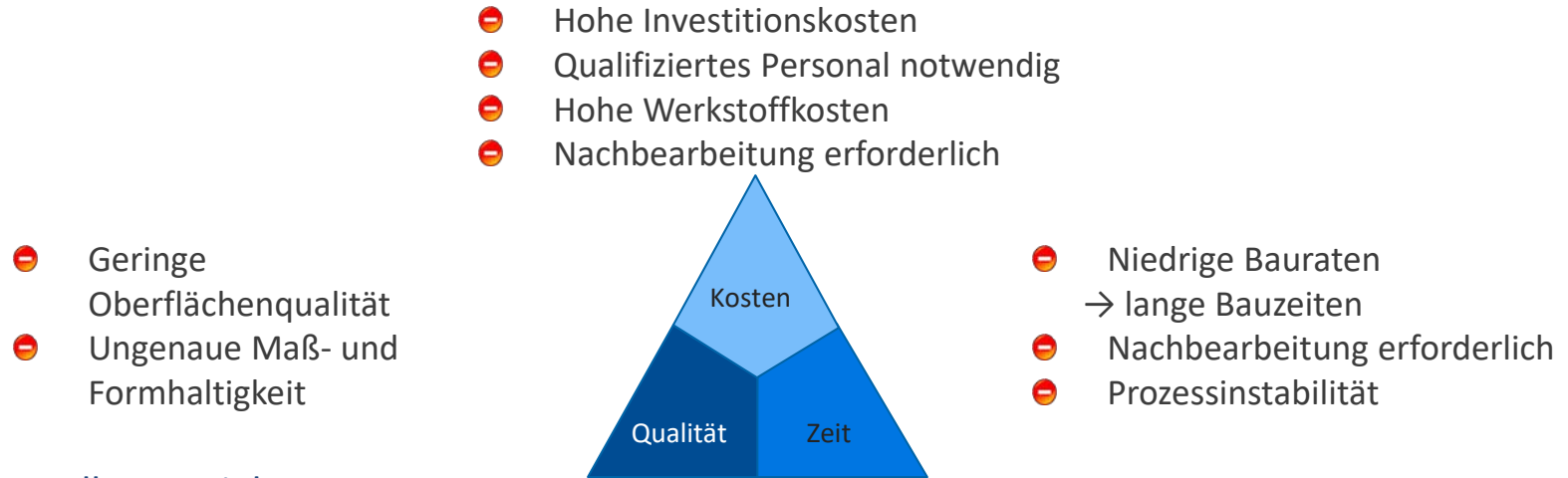
# VORTEILE DES RAPID MANUFACTURING

- ⊕ Neue Geometriefreiheitsgrade
  - Hinterschnitte
  - Funktionsintegration
  - neue Designmöglichkeiten
- ⊕ Fertigung individueller Bauteile (Mass-Customization)
- ⊕ Ersatzteilproduktion „on demand“
- ⊕ Parallelproduktion unterschiedlicher Bauteile
- ⊕ Konstanter Rüstaufwand
- ⊕ Geringe Instandhaltungskosten
- ⊕ „Werkzeugloser / verschleißfreier“ Betrieb

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# NACHTEILE DES RAPID MANUFACTURING

(Bei „reiner“ Substitution konventioneller Fertigungsverfahren)



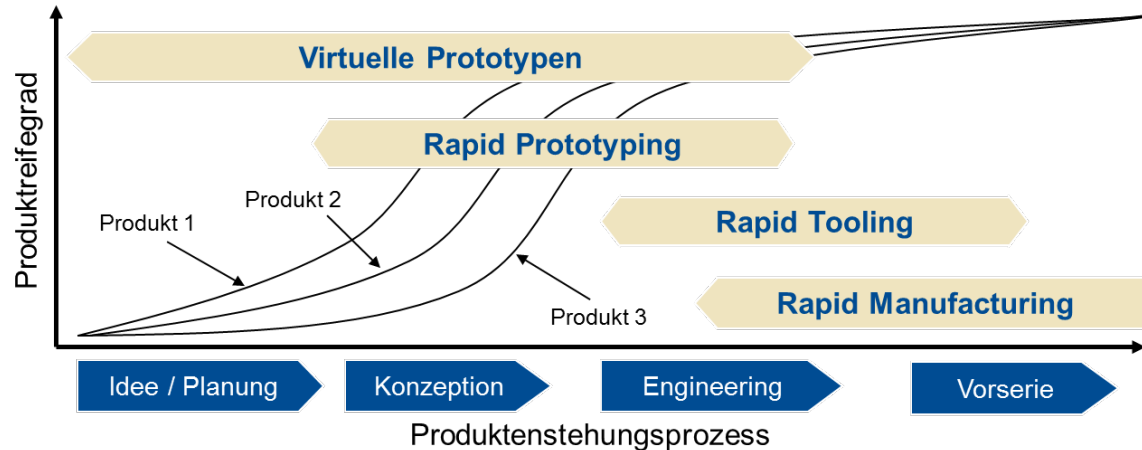
### Handlungsspielraum:

- Unzureichender Wissenstransfer zwischen den Anwendern und zu potenziellen Anwendern
- Niedriger Bekanntheitsgrad der Eigenschaften der additiven Verfahren

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# PRODUKTENTSTEHUNGSPROZESS

- Für den Anwender ist es von Interesse zu wissen, welche additiven Fertigungsverfahren zur Herstellung welcher Art von Bauteilen besonders geeignet sind
- Die additiven Fertigungsverfahren / Rapid Technologien sind fester Bestandteil des Produktentstehungsprozesses
- Sie werden zur Herstellung von Prototypen, Werkzeugen und Serienteilen eingesetzt



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# BEISPIELE AUS DER PRAXIS

RP

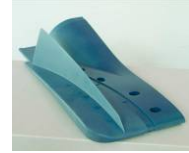
### Funktionsprototyp (*Lasersintern*)

Kabelstecker  
Kfz-Bereich  
aus PA 12



### Funktionsprototyp (*Stereolithographie*)

Aerodynamischer  
Funktionskörper aus  
nanogefülltem Epoxid-Harz



### Konzeptmodell (*Stereolithographie*)

Designstudie - Bett



### Geometrieprototyp (*Lasersintern*)

Gepäckträger –  
Motorrad



RM

### Produkt (*Stereolithographie*)

Im-Ohr-Hörgerät  
aus Acrylat



### Produkt (*selektives Strahlschmelzen*)

Zahnrestauration aus CoCr



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# DIREKTE PROZESSKETTE

Einsatzfähige Teile entstehen im gewünschten Werkstoff in einem einstufigen Prozess, wobei ggfs. Supportentfernung und Reinigung erforderlich sein kann. Diese Prozesse bieten damit je nach Technologie und Werkstoffverfügbarkeit in der Regel die größten Vorteile gegenüber konventionellen Verfahren hinsichtlich:

- Funktionsintegration
- Kosten
- Zeit



### Applikationsbeispiel

- Im-Ohr-Hörgerät  
Direkte Herstellung via Digital Light Processing

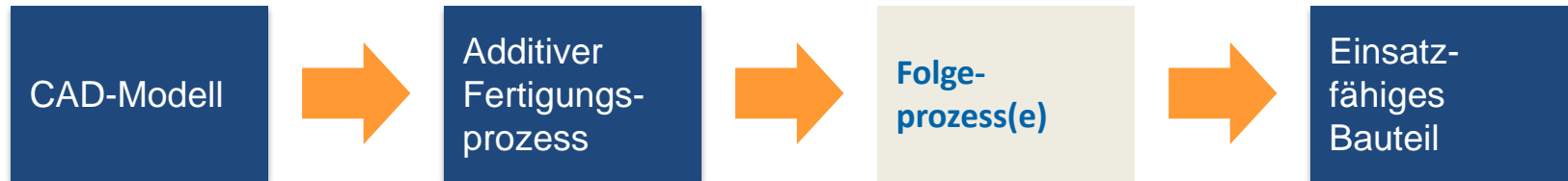


## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# DIREKTE (MEHRSTUFIGE) PROZESSKETTE

Einsatzfähige Teile entstehen in mehreren Schritten, bei denen sich typischerweise an die additive Fertigung ein oder mehrere Folgeprozesse anschließen (z.B. chemische oder thermische Umwandlungen, Infiltration).

Sinnvoll, wenn eigentliche Geometrieerstellung schnell und/oder kostengünstig erfolgen soll und zusammen mit dem Aufwand der nachfolgenden Schritte immer noch Vorteile gegenüber alternativen Fertigungsverfahren bleiben.



2.1 Urformen – Additive Fertigung

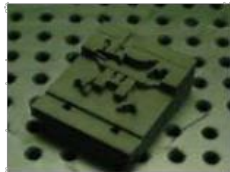
# DIREKTE MEHRSTUFIGE PROZESSE - BEISPIEL

## Rohrleitungen

Herstellung eines Grünlings, der anschließend infiltriert wird.



[www.3dsystems.com]



Herstellung des Grünlings  
in der Sintermaschine



Einbetten des Grünlings  
und Bronze-Infiltrats in  
Aluminiumpulver



Entbinden und Bronze-  
infiltrieren im Ofenprozess



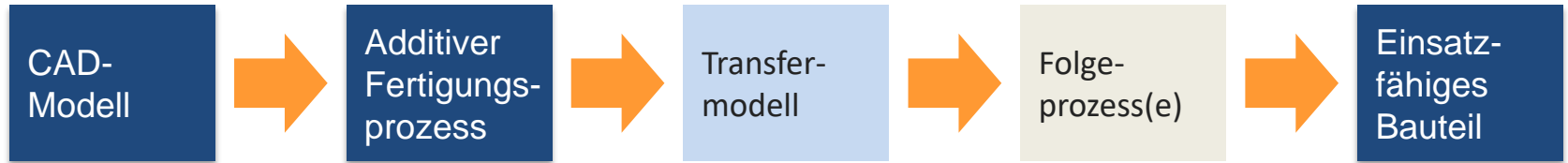
Oberflächenbehandlung je  
nach Anwendung

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# INDIREKTE PROZESSKETTE

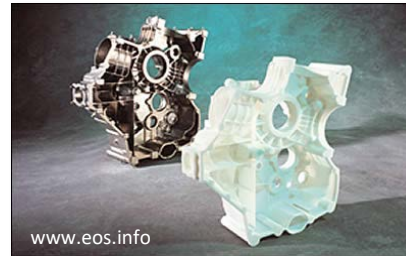
Die additiv hergestellten Teile entsprechen nicht den einsatzfähigen Teilen, sondern ersetzen Einrichtungen, Modelle oder Werkzeuge für nachfolgende Fertigungsverfahren wie Erodieren, Umformen oder Gießen.

- Zeit- und Kostenvorteile, wenn durch den Einsatz solcher Teile Modelleinrichtungen oder Werkzeuge eingespart werden können



### Applikationsbeispiel

- Getriebegehäuse  
Feinguss mit verlorenem RP-Modell aus amorphem Kunststoff



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# EINTEILUNG NACH PHYSIKALISCHEN VERFAHREN

### 1. Generieren aus der flüssigen Phase

- Verfestigung, vorzugsweise durch Polymerisation flüssiger oder teigiger Materialien (laser- oder lampengestützte Stereolithographie, Polymerdrucken)

### 2. Generieren aus der festen Phase

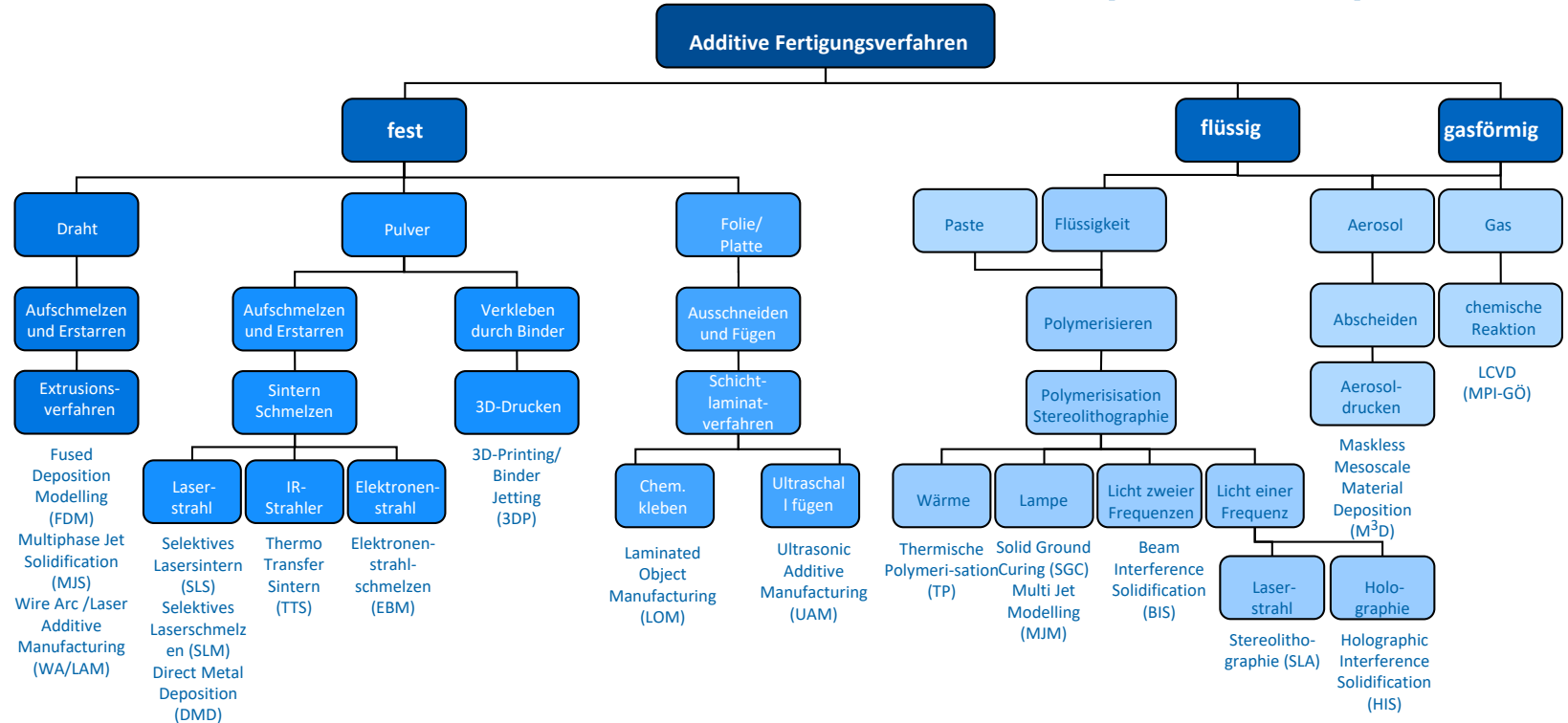
- An- oder Aufschmelzen und Verfestigen von Pulvern, Pulvermischungen oder Granulaten (Sinter- und Schmelzverfahren)
- Ausschneiden oder Ausfräsen aus Folie, Bändern oder Platten (Schicht-Laminat-Verfahren)
- An- oder Aufschmelzen und Verfestigen von festen Materialien (Extrusionsverfahren)
- Verkleben von Granulaten oder Pulvern durch Binder (3D-Printing)

### 3. Generieren aus der Gasphase

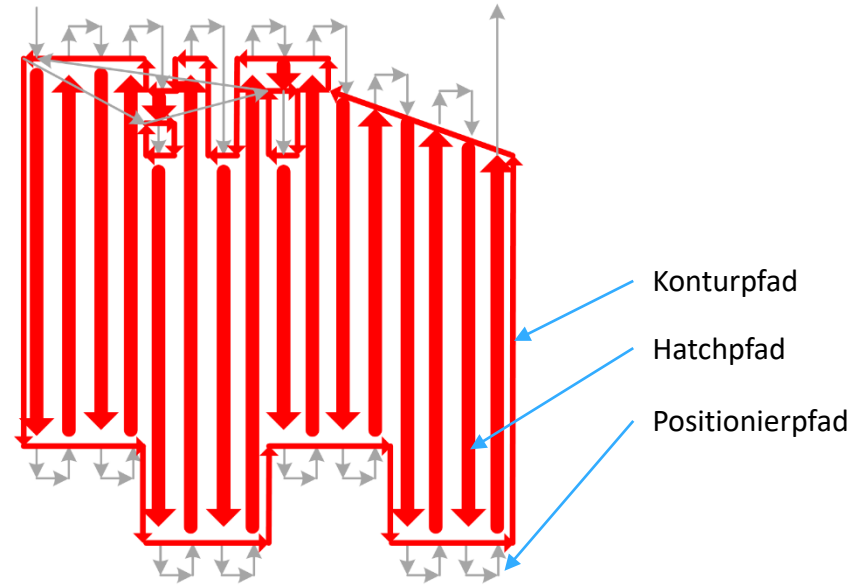
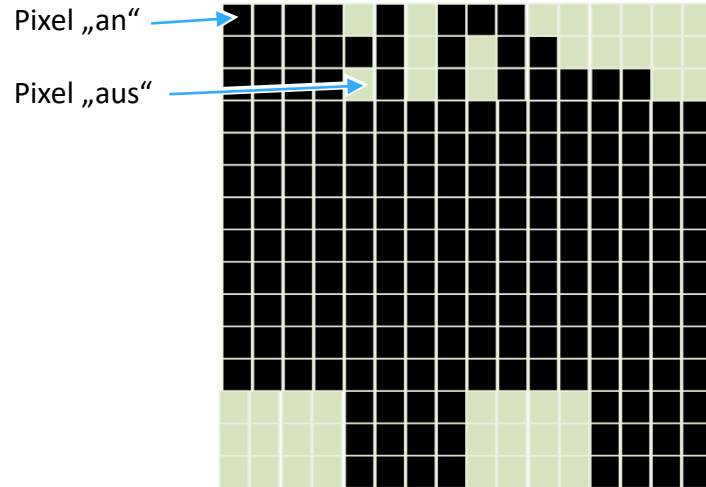
- Physikalisches Abscheiden aus Aerosolen
- Chemisches Abscheiden aus der Gasphase

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# EINTEILUNG NACH MATERIALZUSTAND (AUSZUG)



# RASTER VS. VEKTOR



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# TECHNOLOGISCHE PROZESSKETTE

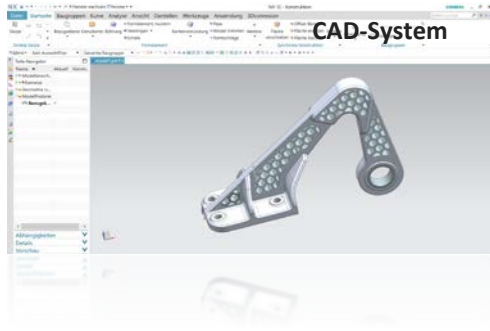
1. CAD Modell
2. Modellaufbereitung
3. Prozessvorbereitung
4. Bauprozess
5. Nachbearbeitung
6. Anwendung

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# VERFAHRENSABLAUF

### 1. 3D-CAD-Modell

- Ausgangspunkt des Fertigungsprozesses
- Die 3D-CAD-Daten stammen aus der Konstruktion,
- dem Reverse Engineering oder aus der Medizin (Computertomographie)
- Formate z. B.: STL, IGES, STEP

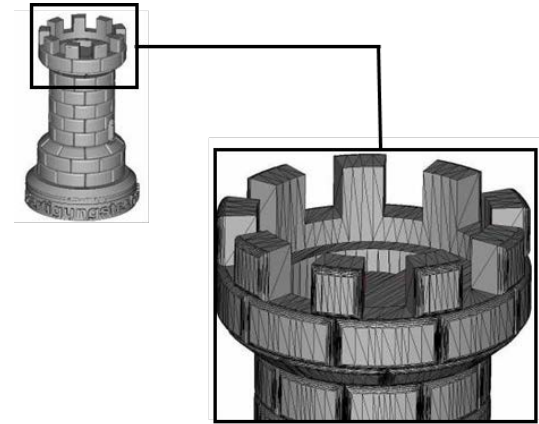


## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# VERFAHRENSABLAUF

### 2. Triangulation

- Möglichst genaue Annäherung der Geometrieoberfläche durch Dreiecke
  - Triangulationsfehler treten verstärkt an stark gekrümmten Freiformflächen auf
- Anzahl der Dreiecke so **genau wie nötig**, aber nicht so genau wie möglich gestalten.
- Die Überprüfung der Geometrie des Bauteils ist nach der Triangulation unabdingbar



STL-Modell mit triangulierter Oberfläche



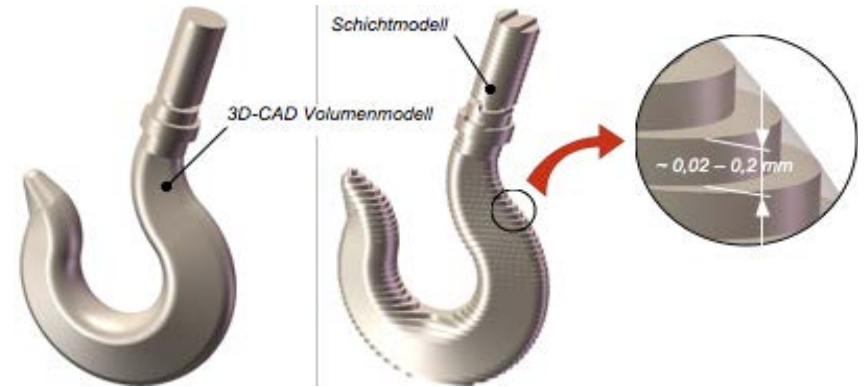
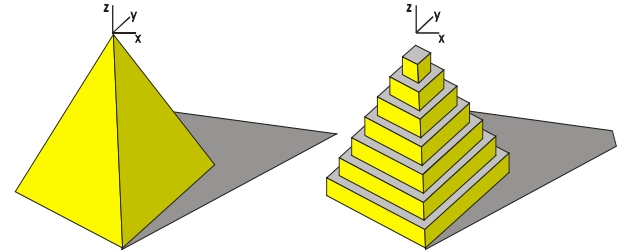
Gefertigtes Bauteil

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# VERFAHRENSABLAUF

### 3. Modellaufbereitung

- Bauteil (STL-Modell) in Schichten „zerlegen“
- Für jede Schicht werden Geometrieinformationen für den Bauvorgang erzeugt
- „Stufeneffekt“ an Rundungen, Freiformflächen und stumpfen Winkeln  
→ geringe Oberflächenqualität.

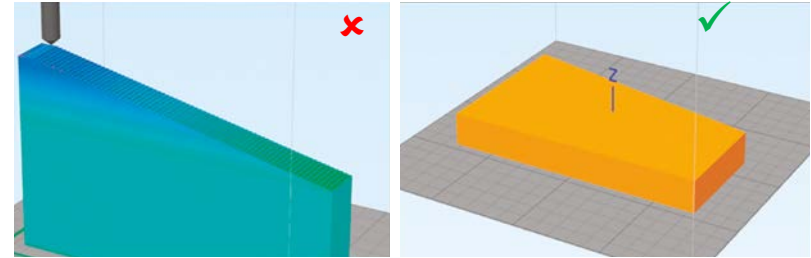


## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# VERFAHRENSABLAUF

### 3. Modellaufbereitung

- Für gute Oberflächenqualität und -genauigkeit sollten gerade Bauteilflächen *möglichst vertikal oder horizontal* im Bauraum angeordnet sein  
→ Stufeneffekte werden minimiert.
- Je größer die Schichtdicke ist, desto kürzer die ist Bauzeit aber der Stufeneffekt wird größer.  
→ abwägen von Qualität und Produktivität



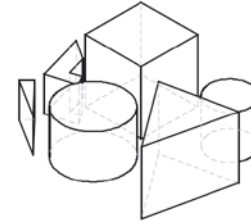
## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# VERFAHRENSABLAUF

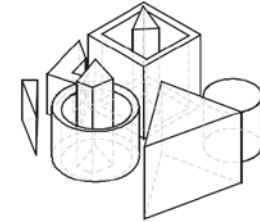
### 3. Modellaufbereitung

- Durch optimales *Verschachteln (nesting)* und *Packen (packing)* kann bei der Einhaltung der geforderten Qualität höhere Produktivität erzielt werden
- Die Verschachtelung bzw. das Packen haben verfahrensabhängig unterschiedliche Optionen

*Verschachteln (nesting)*

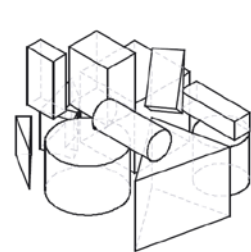


a) *nebeneinander*

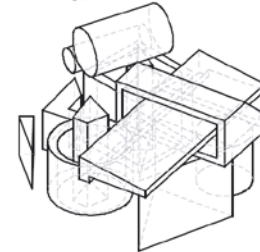


b) *nebeneinander, ineinander*

*Packen (packing)*



c) *nebeneinander, übereinander*



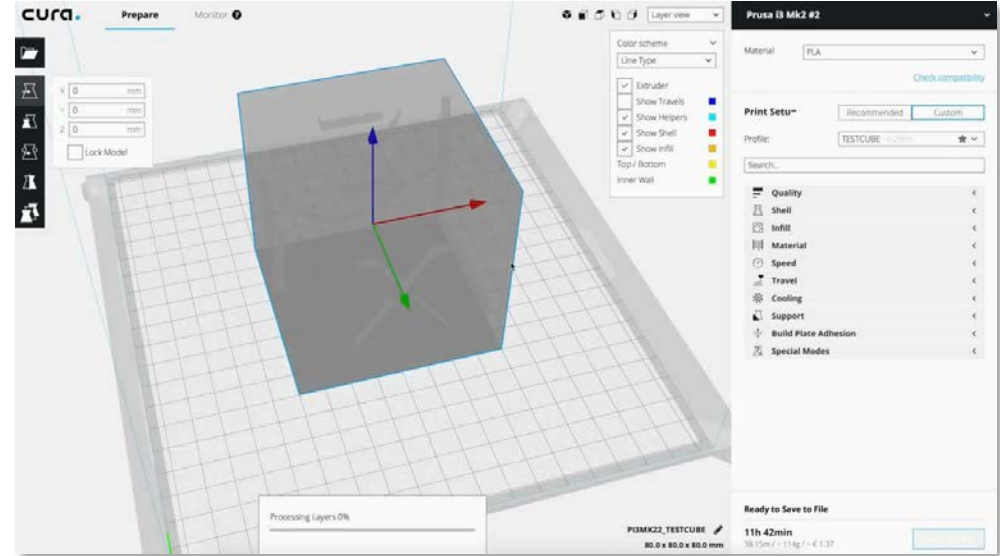
d) *nebeneinander, übereinander, ineinander*

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# VERFAHRENSABLAUF

### 4. Prozessvorbereitung

- Verfahrensunabhängig sind Informationen über die „Füllung“ (*infill*) des Bauteils anzugeben (im STL-Datensatz sind nur Informationen zur Oberfläche hinterlegt)
- Wirkt sich u.a. auf Materialbedarf, Bauteilgewicht, Bauzeit, Stabilität des Bauteils aus

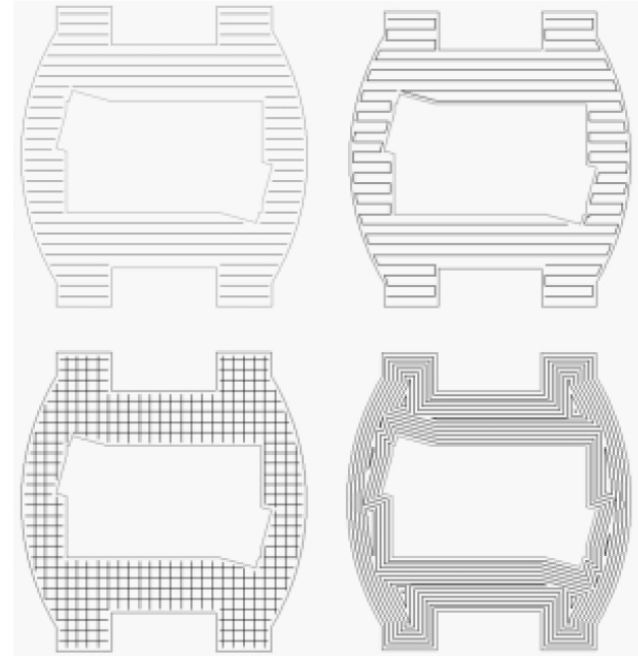


## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# VERFAHRENSABLAUF

### 4. Prozessvorbereitung:

- Schichtinformationen werden in die Steuerinformationen der Anlage umgewandelt
- Materialspezifische Verarbeitungseigenschaften sind zu beachten
- Scannen: Pfade berechnen, die während des Bauprozesses abgefahren werden
  - Einfluss u.a. auf Bauzeit, Energie- und Temperaturverteilung auf der Bauplattform



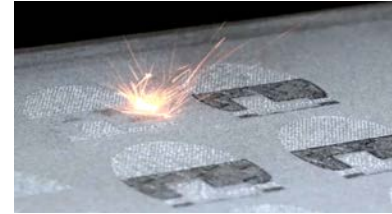
Unterschiedliche Scan-Strategien beim SLS

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

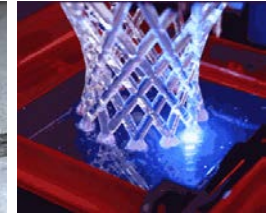
# VERFAHRENSABLAUF

### 5. Bauprozess:

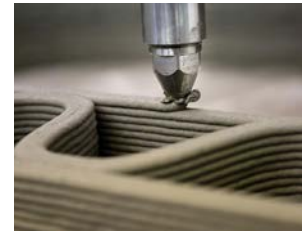
- Ausgangsmaterialschicht wird auf die Bauplattform aufgebracht (Pulver- und Flüssigbettprozesse)
- Ausgangsmaterial wird selektiv durch eine Energiequelle kurzzeitig geschmolzen oder einen chemischen Aktivator verfestigt
- Absenken der Plattform um eine Schichtdicke und Aufbringen einer neuen Materialschicht



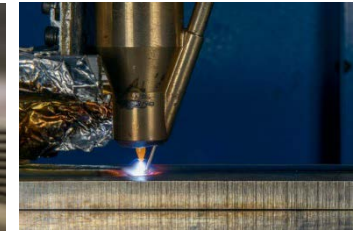
SLM-Prozess



DLP-Prozess



Material extrudieren



WAAM-Prozess

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# VERFAHRENSABLAUF

### 6. Nachbearbeitung:

- Nicht verwendetes Material entfernen
- Stützkonstruktionen entfernen (verfahrensabhängig)
- Material aushärten (verfahrensabhängig)



Pulverentfernung



Metallbauteil mit Stützstruktur



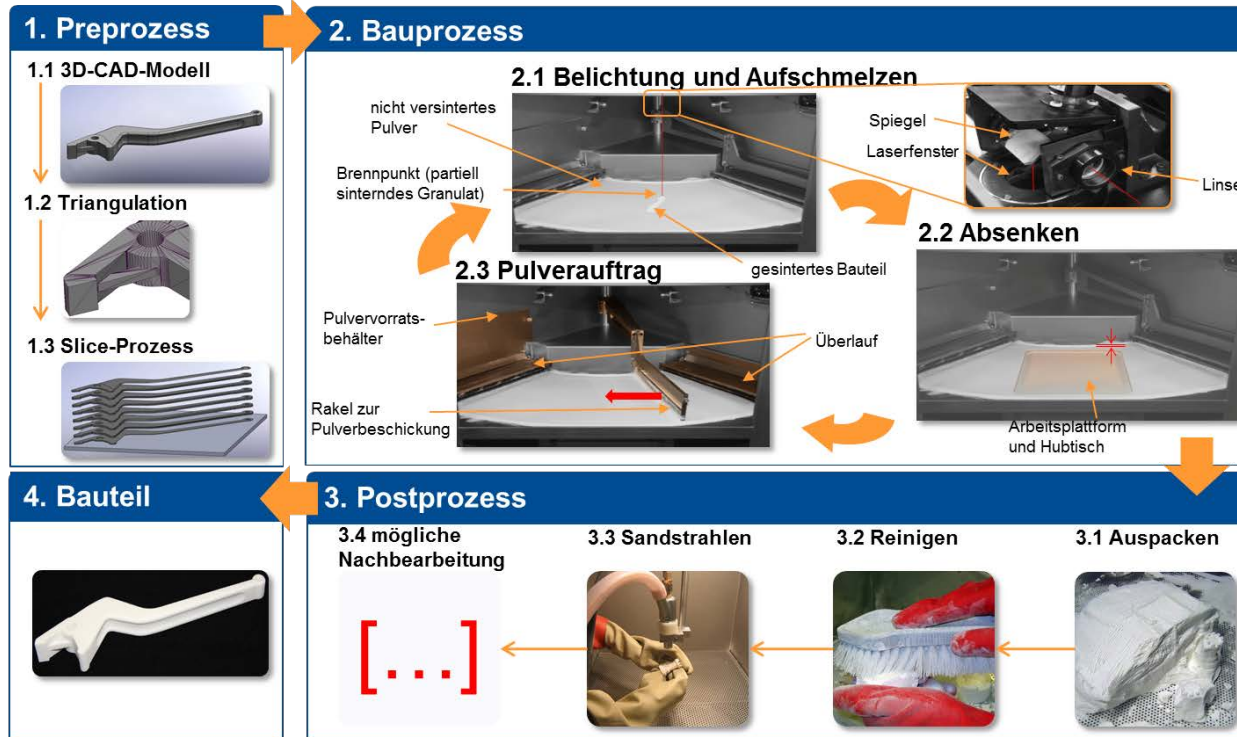
SLA-Bauteil

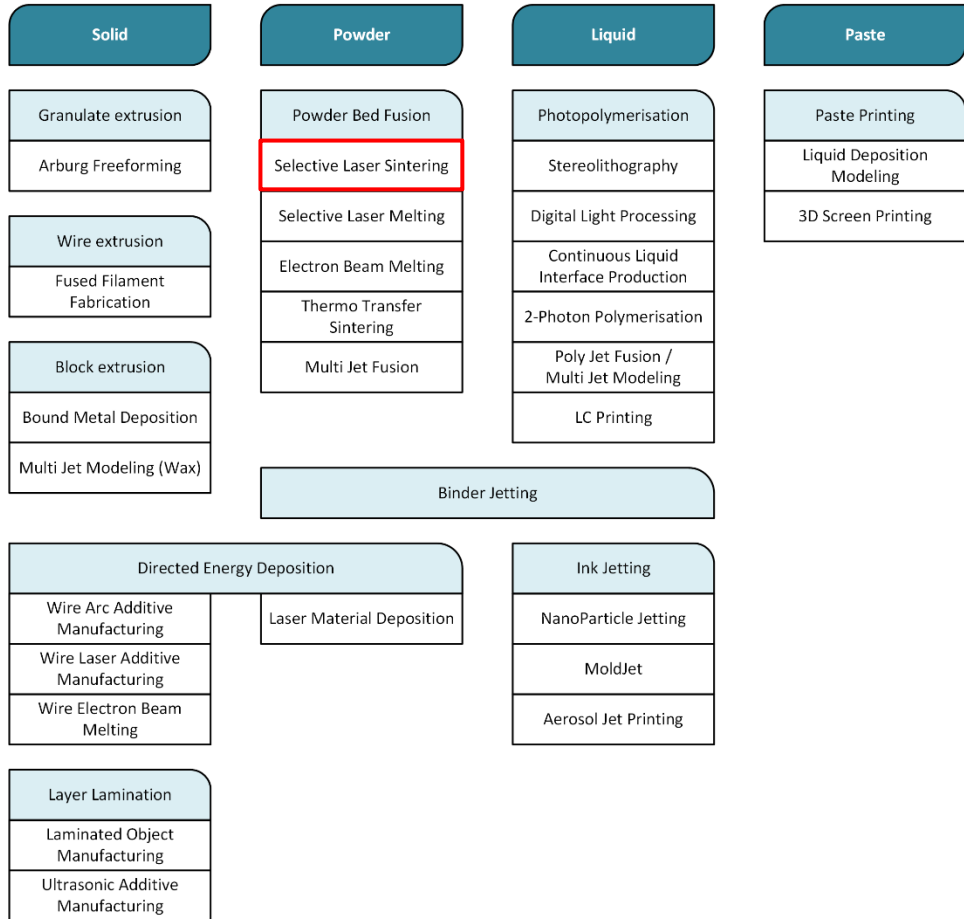


UV-Aushärtekammer

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# PROZESSABLAUF AM BEISPIEL SLS





## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

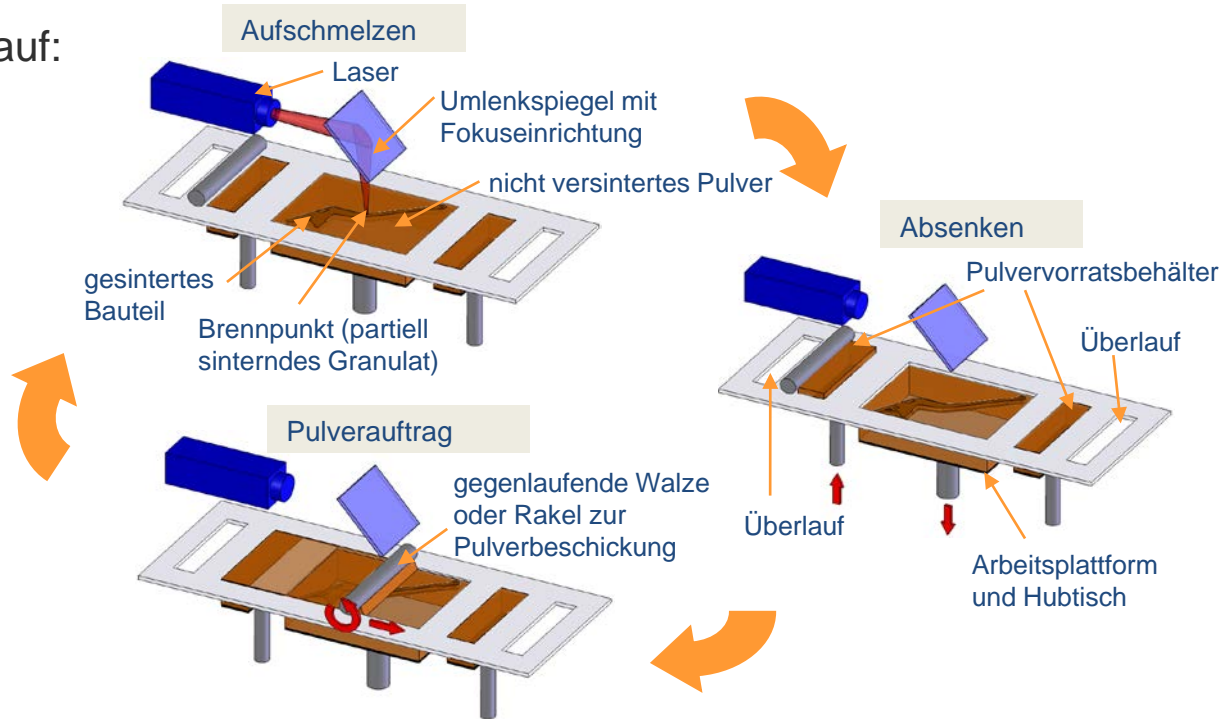
# SLS: KURZBESCHREIBUNG nach VDI 3405

<b>Bauprozess</b>	Schicht-für-Schicht-Bauprozess durch lokales Sintern pulverförmiger Werkstoffe unter Einwirkung von Laserstrahlung
<b>Ausgangsmaterial</b>	Pulverförmig: teilchenverstärkte <b>Polymere</b> , Polymermischungen, niedrigschmelzende Metalllegierungen, Keramiken mit Füllstoff oder Binder
<b>Bindungsmechanismus</b>	Physikalisch (thermisch)
<b>Vorgehen bei Materialverarbeitung</b>	Vektororientiert
<b>Aktivierungsenergie</b>	Erwärmung durch Laser; Vorheizen mit (Infrarot-)Strahler
<b>Postprozess</b>	Kontrolliertes Abkühlen, Entpacken, Reinigen mittels Druckluft Verbesserung der Bauteiloberflächen durch Folgetechnologien: Gleitschleifen (Trowalisieren) / Strahlen / Lackieren

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

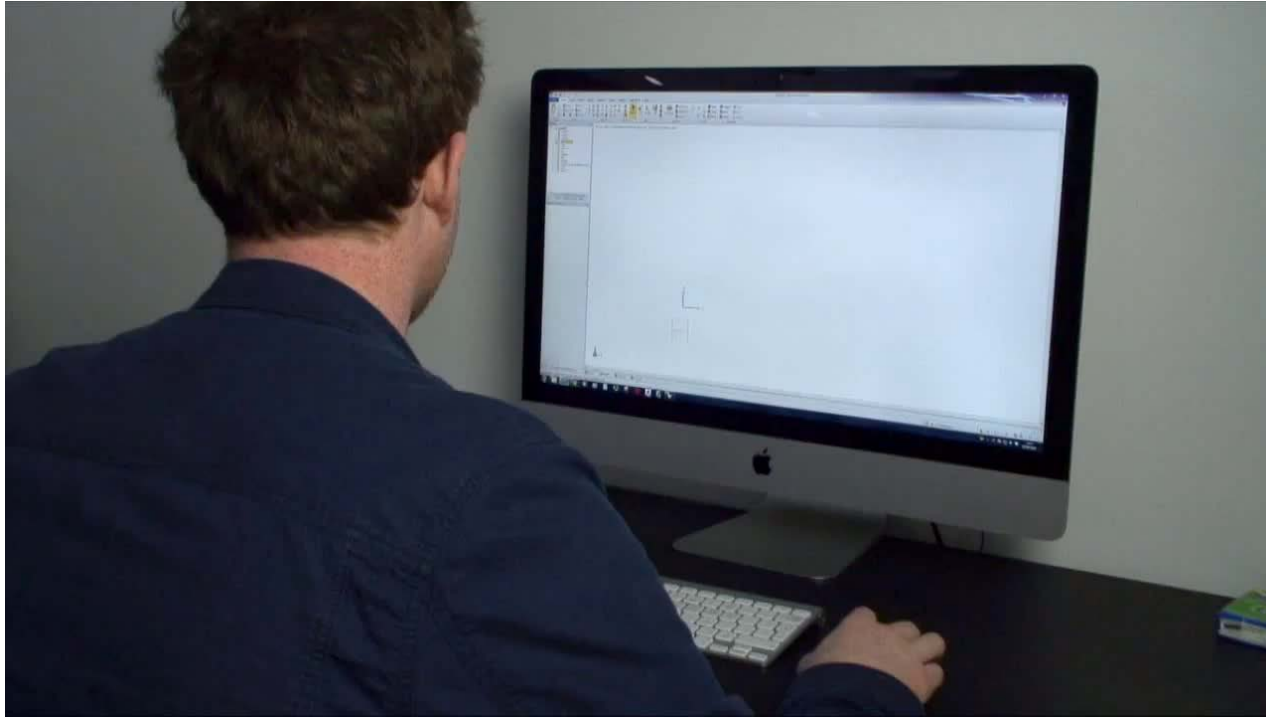
# SELEKTIVES LASER-SINTERN

Verfahrensablauf:



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# SELEKTIVES LASER SINTERN (SLS)



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# SLS - MATERIALIEN

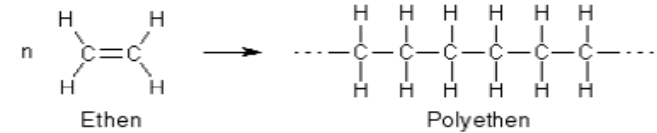
- Prozess kann grundsätzlich mit allen Materialien durchgeführt werden, die sich **thermoplastisch** verhalten, also:
  - unter Wärmeeinbringung an- oder aufschmelzen
  - nach dem Erkalten wieder verfestigen
- **Kunststoffe** eignen sich aufgrund der niedrigen Schmelztemperatur und Ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit
  - Prozess kann lokal begrenzt gehalten werden.
- Verfahrensbedingt sind nur schmelzbare Werkstoffe, wie z. B. Thermoplaste, kunststoffbeschichtete Metalle und Sande, Wachs für das Lasersintern geeignet.
- Die größte Verbreitung finden derzeit die teilkristallinen Thermoplaste wie das Polyamid 12.
- Es erfolgt keine Herstellung von direkten Metallbauteilen. (Herstellung von Metallbauteilen durch Aufschmelzen von polymerummantelten Metallpulvern)

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# SLS – HERSTELLUNG VON KUNSTSTOFFEN

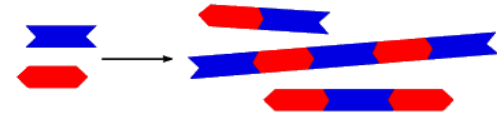
## Polymerisation (PE, PVC)

Kettenreaktion, bei der ungesättigte Moleküle zu Makromoleküle verknüpft werden.



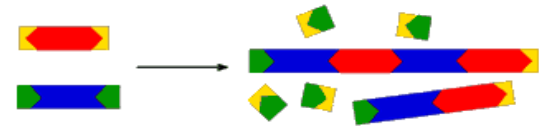
## Polyaddition (POM, PU)

Stufenreaktion, bei der Makromoleküle durch „Addition“ ohne Abspaltung von Nebenprodukten gebildet werden.

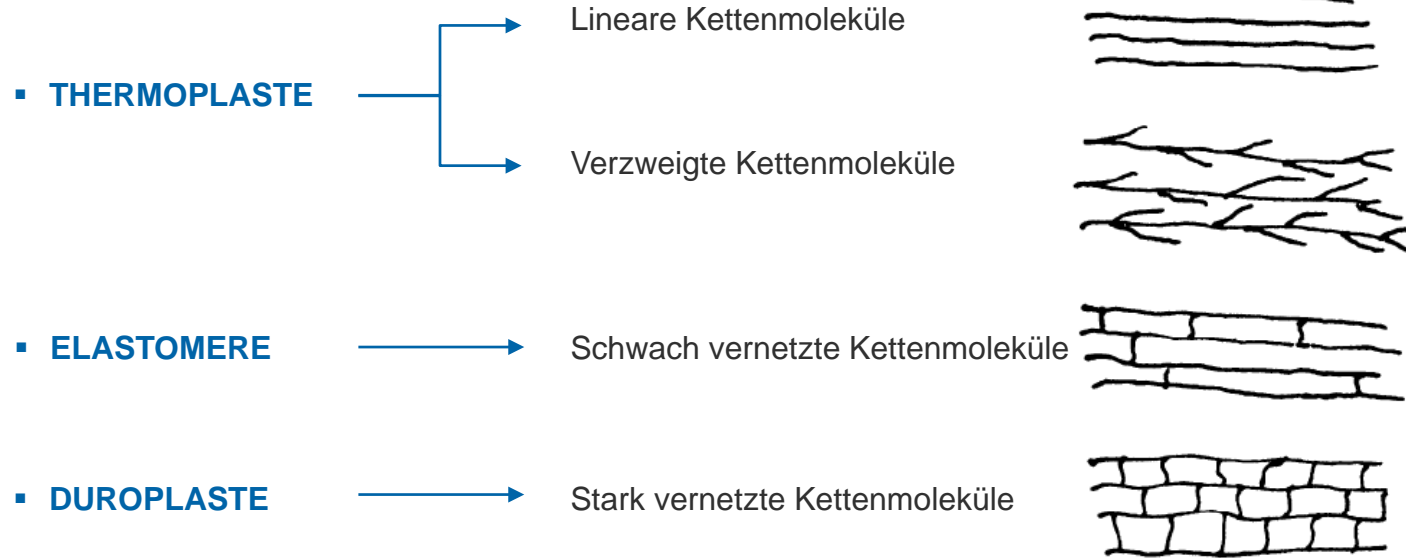


## Polykondensation (PA, PC)

Stufenreaktion, bei der Makromoleküle unter Abspaltung von Nebenprodukten z. B. Wasser, Alkohol gebildet werden.

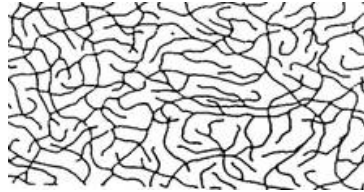


# UNTERTEILUNG DER KUNSTSTOFFE



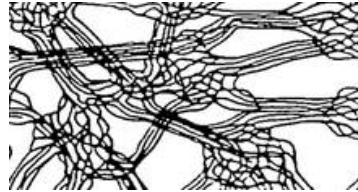
# STRUKTUR VON THERMOPLASTEN

## Amorphe Thermoplaste



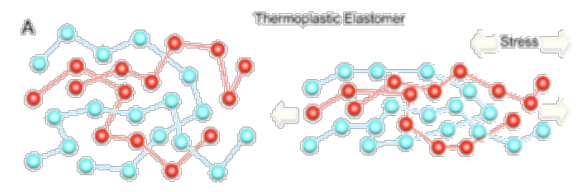
- Molekülketten liegen in völliger Unordnung ineinander verknäult vor
- Meist transparent oder transluzent
- Spröder Werkstoff
- Geringe Chemikalienbeständigkeit
- etc.

## Teilkristalline Thermoplaste



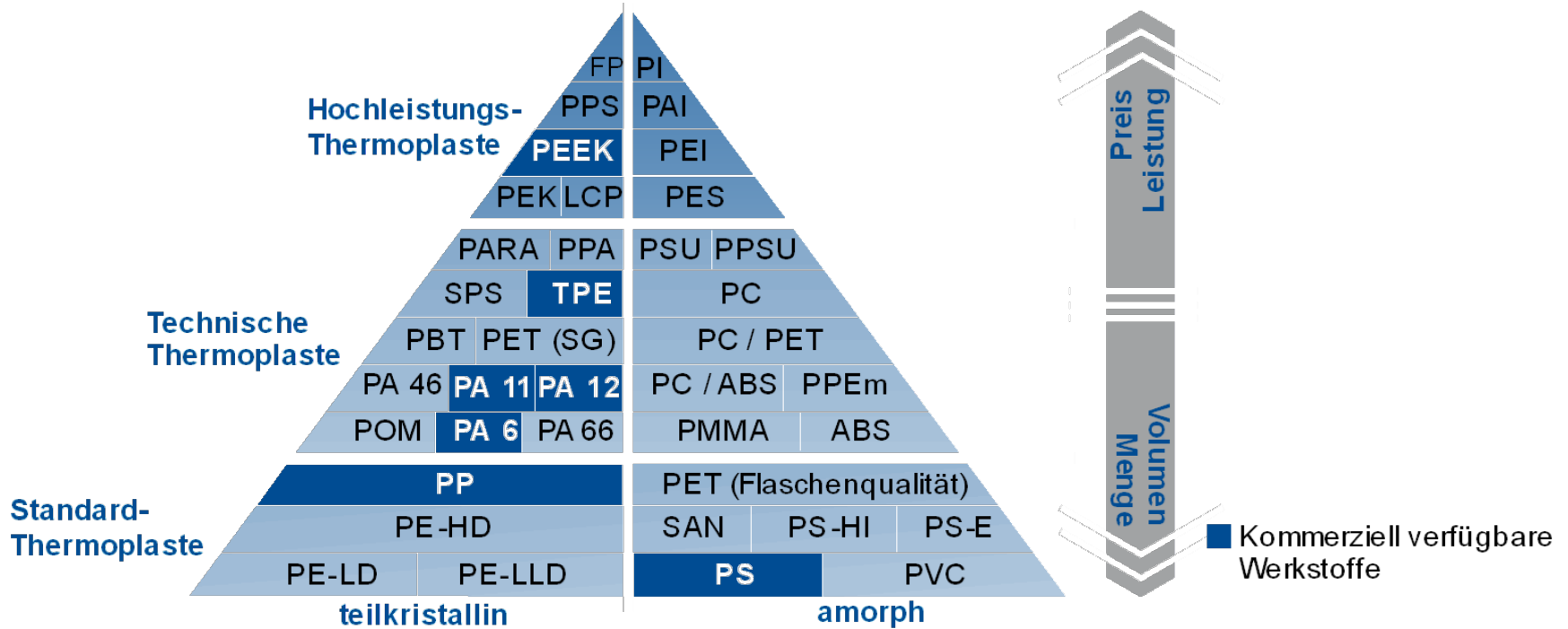
- Molekülketten bilden in manchen Bereichen eine kristalline Struktur aus
- Milchig, trüb
- Zäher Werkstoff
- Hohe Ermüdungsfestigkeit
- Verschleißfest
- etc.

## Thermoplastische Elastomere



- Elastische Polymerketten sind in thermoplastisches Material eingebunden
- Blends und Copolymere mit kurzen, kristallinen Molekülketten
- Gummielastisches Verhalten
- Vereinen der Verarbeitungsvorteile der Thermoplaste mit den Werkstoffeigenschaften der Elastomere
- etc.

# KUNSTSTOFFEINTEILUNG



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# VERWENDBARE MATERIALIEN

### Auswahl kommerziell erhältlicher Materialien der Firma EOS

#### PA 2200

PA 2105  
PA 2200 Balance 1.0  
PA 2200 Performance 1.0  
PA 2200 Speed 1.0  
PA 2200 Top Quality 1.0  
PA 2200 Top Speed 1.0  
PA 2201  
PA 2202 black  
PA 2210 FR  
PA 2241 FR  
PrimePart® PLUS PA 2221

#### PEEK

EOS PEEK HP3

#### TPA

PrimePart® ST PEBA 2301

#### PA 2200 (gefüllt)

Alumide  
CarbonMide  
PA 3200 GF

#### Polystyrol

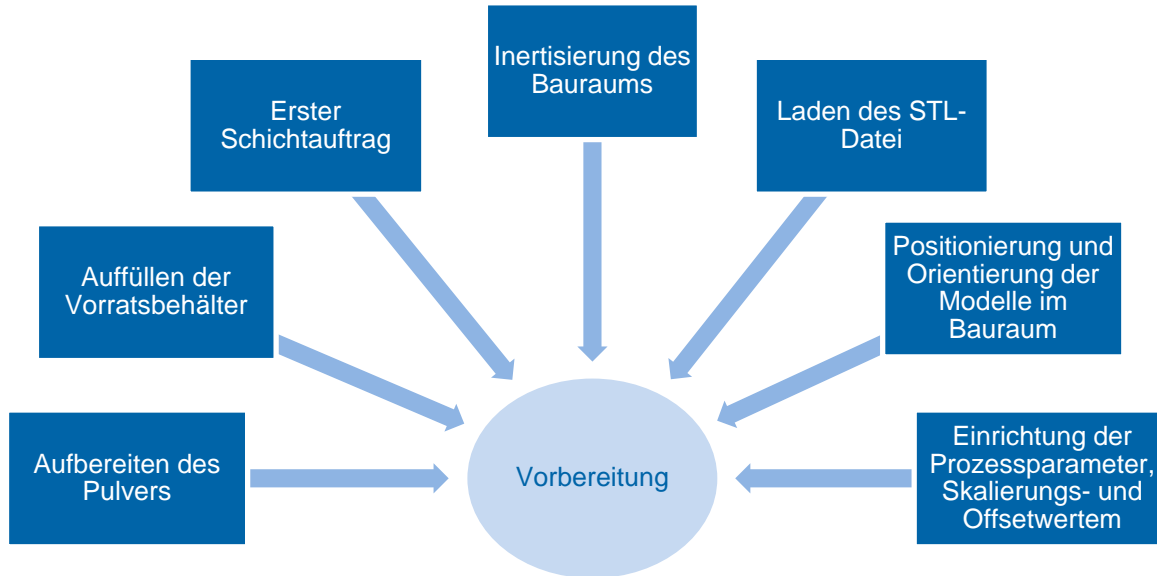
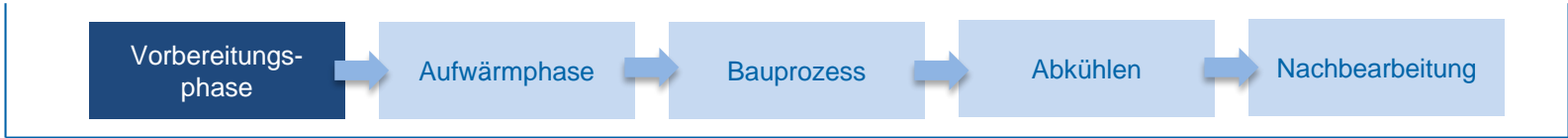
PrimeCast 101

#### PA 11xx

PA 1101  
PA 1102 black

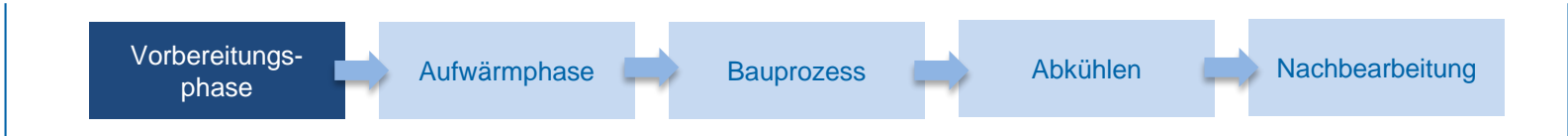
## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# SLS: VORBEREITUNGSPHASE



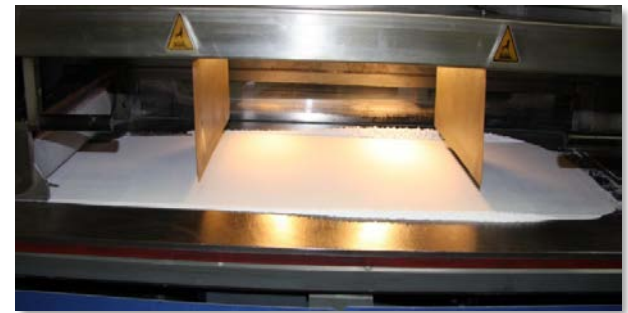
## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# SLS: VORBEREITUNGSPHASE



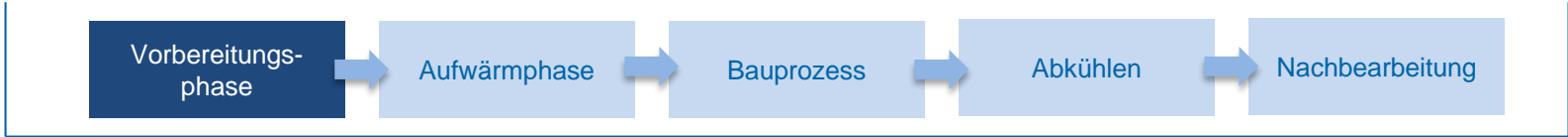
### Erster Schichtauftrag (Am Beispiel des Anlagensystems DTM 2500)

- Die Walzenlängsachse bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit  $v_L$  parallel zum Pulverbett
- Die Walze rotiert mit der Geschwindigkeit  $v_R$  (Roller Speed) relativ zur Pulveroberfläche.
- Die Drehrichtung unmittelbar über dem Pulverbett ist dabei der Richtung von  $v_L$  gleichgesetzt (Gegenrotation)



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# SLS: VORBEREITUNGSPHASE

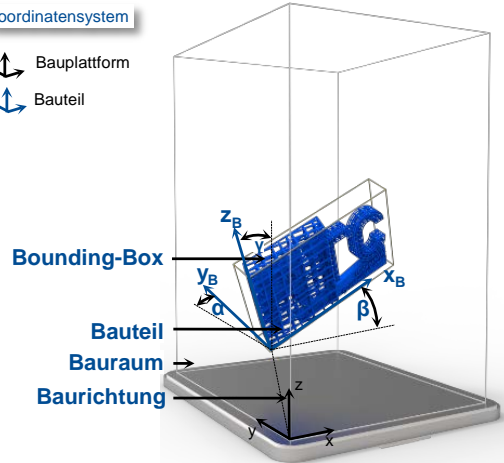


### Laden der STL-Dateien // Positionierung und Orientierung der Modelle im Bauraum

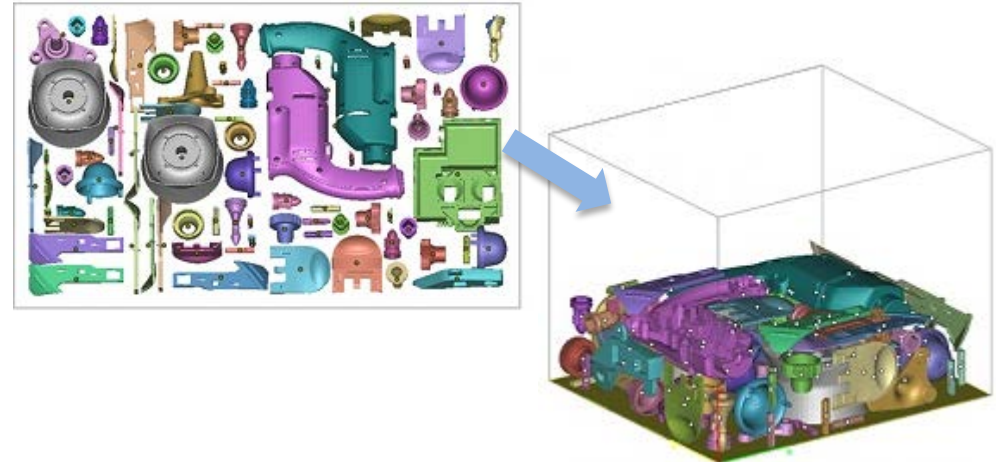
#### Bauraum- und Bauteilkoordinatensystem

Koordinatensystem

- Bauplattform
- Bauteil

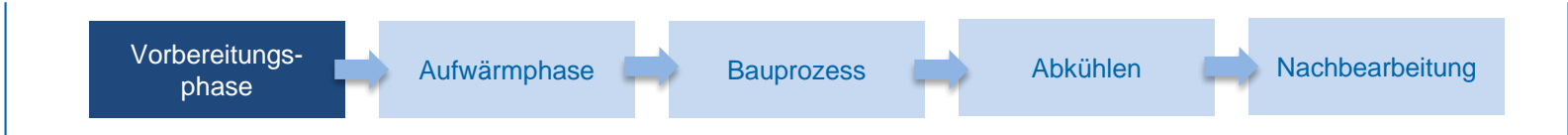


#### Lösen von Verschachtelungsproblemen

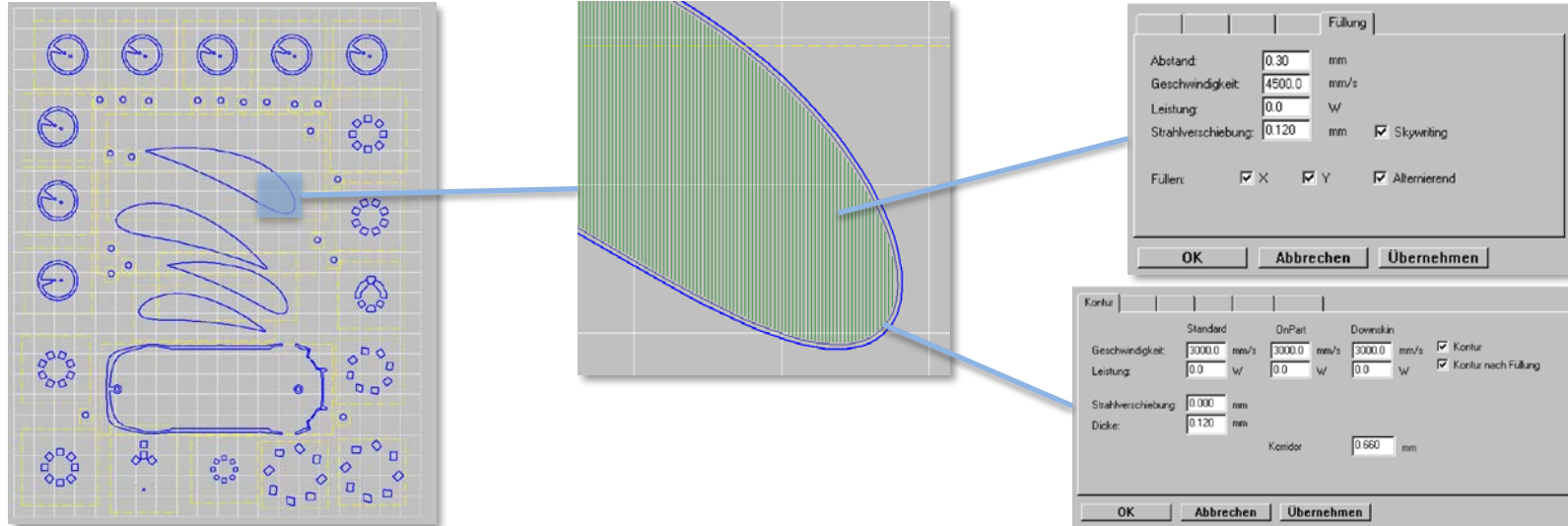


## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# VORBEREITUNGSPHASE



### Einrichtung der Prozessparameter, Skalierungs- und Offsetwerte



The image shows a CAD environment with a 2D layout of several parts. A blue arrow points from one part to a zoomed-in view of a semi-circular part filled with green hatching. Two dialog boxes are open, showing process parameters for 'Füllung' (filling) and 'Kontur' (contour).

**Füllung Dialog:**

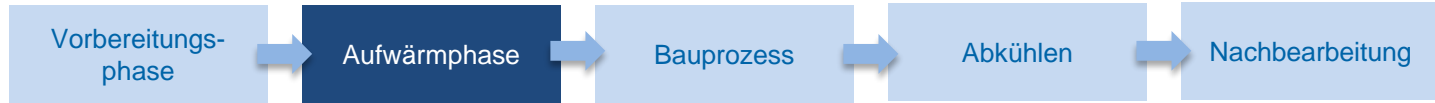
Abstand:	0.30	mm
Geschwindigkeit:	4500.0	mm/s
Leistung:	0.0	W
Stahlverschiebung:	0.120	mm
		<input checked="" type="checkbox"/> Skywriting
Füllen:	<input checked="" type="checkbox"/> X	<input checked="" type="checkbox"/> Y
		<input checked="" type="checkbox"/> Alternierend

**Kontur Dialog:**

	Standard	DrPart	Downskin	
Geschwindigkeit:	3000.0	3000.0	3000.0	<input checked="" type="checkbox"/> Kontur
Leistung:	0.0	0.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/> Kontur nach Füllung
Stahlverschiebung:	0.000			
Dicke:	0.120			
		Korridor	0.660	mm

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# SLS: AUFWÄRMPHASE



### IR-Strahler:

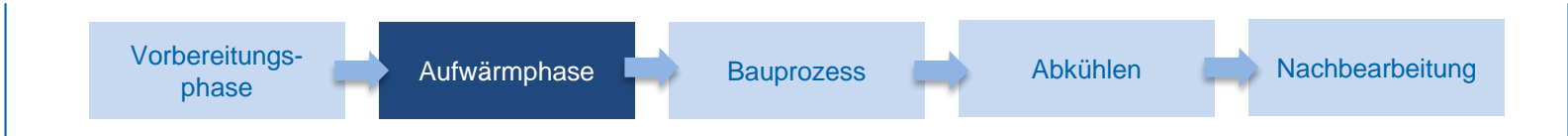
- Die Differenz zwischen Schmelz- und Vorwärmtemperatur  $T$  an der Pulveroberfläche muss möglichst gering sein (maximal 10 - 12 °C)
- Temperaturdifferenz führt durch Schrumpfung zu Eigenspannungs- und Verzugseffekten

### Der Vorwärmtemperatur kommt daher eine zentrale Bedeutung zu.

- Ist sie zu niedrig, kommt es zu nicht ausreichender Versinterung/Verschmelzung und Verzug
- Ist die Vorwärmtemperatur zu hoch gewählt, kann sie ein Zusammenbacken des gesamten Pulverkuchens bewirken

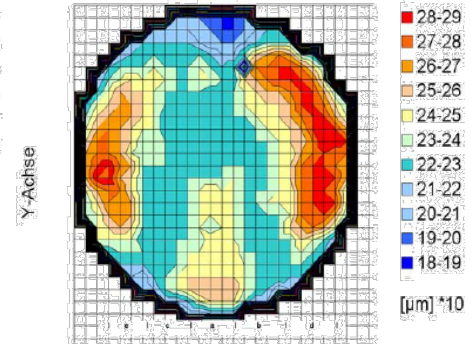
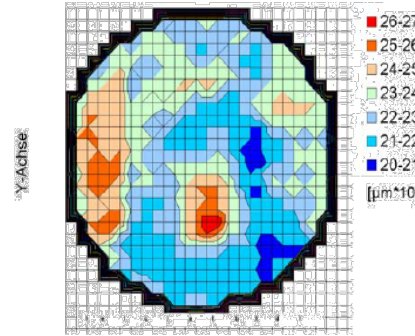
## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# SLS: AUFWÄRMPHASE



## Homogenität:

- Durch längere Zykluszeiten wird ein gleichmäßiges Temperaturprofil innerhalb des Pulverbettes ausgebildet
- Homogen ausgebildetes Temperaturprofil ist eine notwendige Voraussetzung für qualitativ hochwertige Lasersintererteile
- In der ca. 2,5 h dauernden Phase werden keine Bauteile generiert
- Die Aufwärmphase hängt sehr von der Anlage, Bauraumgröße und auch der zu erreichenden Aufwärmtemperatur ab und kann daher variieren

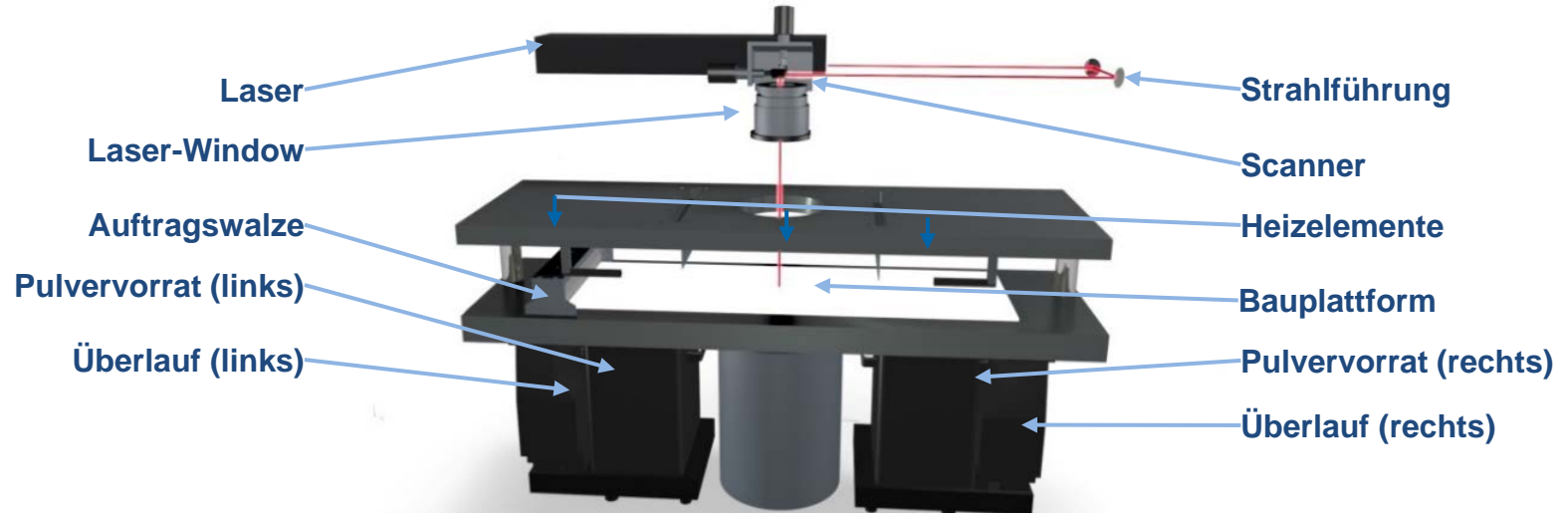


## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# SLS: BAUPROZESS



### Funktionsprinzip des Laser-Sinterns am Beispiel des Anlagensystems DTM 2000

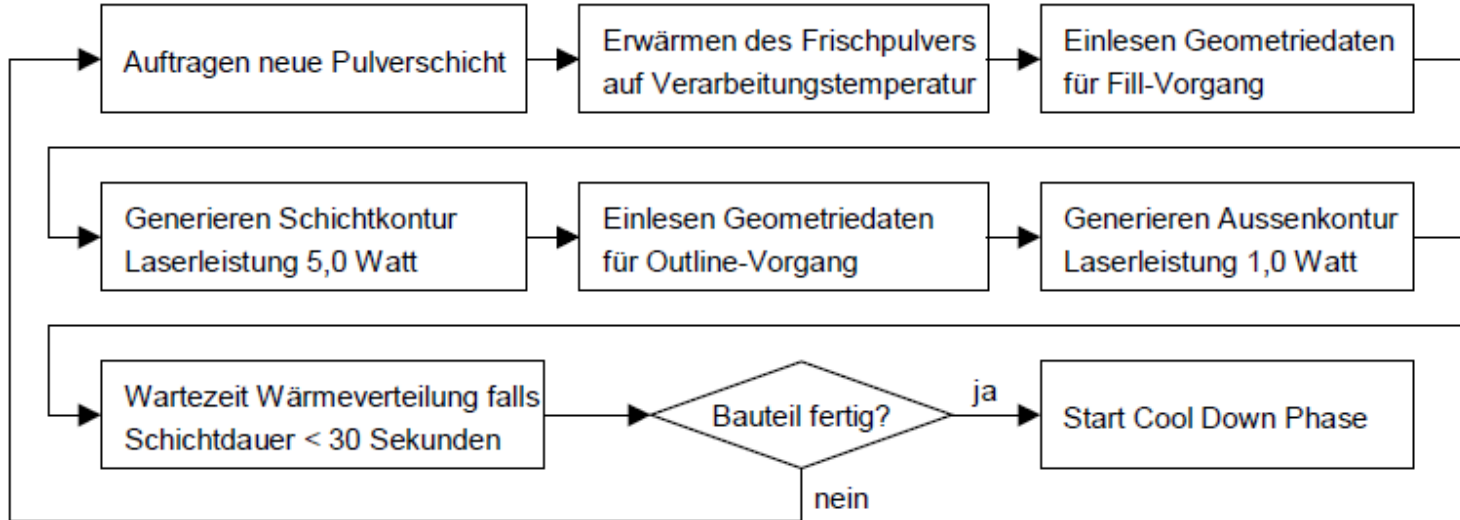


## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# SLS: BAUPROZESS



### Kontinuierlicher Ablauf nach folgendem Schema



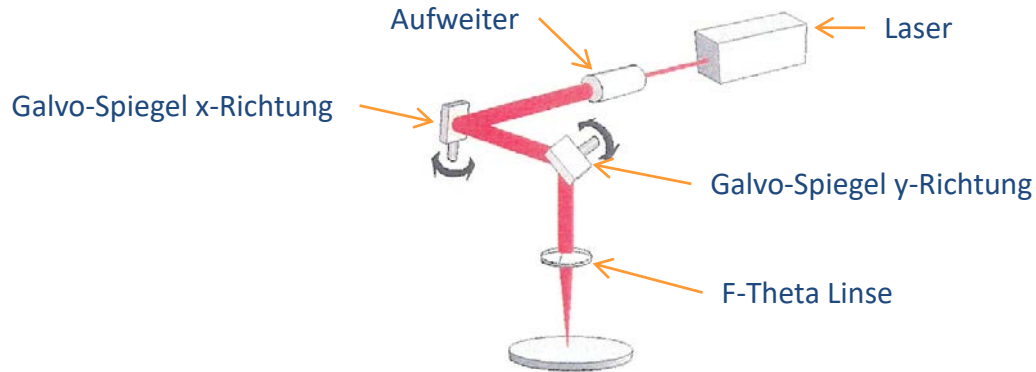
## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# SLS: BAUPROZESS



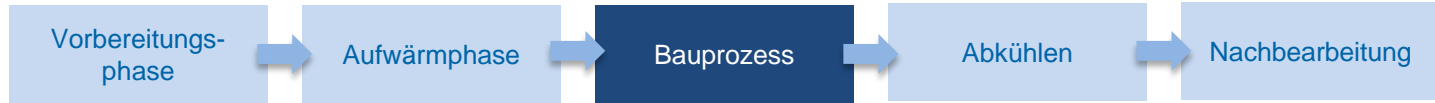
## Scanner

- Frei programmierbare Ablenkensysteme, die den Laserstrahl auf der Bauebene bewegen
- Drehbare motorgetriebene Spiegeleinheiten (Galvanometerprinzip)
- Zwei Galvos werden orthogonal zueinander ausgerichtet (je einer in x- und y-Richtung)



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# SLS: BAUPROZESS



### Flächenbelichtung

- Der Fill-Laser dient zur Erzeugung der Schichtgeometrie und liefert die Energie zum Aufschmelzen des Pulvers
- Energieeintrag des Lasers ist bestimmt durch seine Leistung, die Scangeschwindigkeit und den Hatch
- Die Leistung bestimmt den Verdichtungsgrad des Werkstoffs

### Konturbelichtung

- Der Outline-Laser hat die Aufgabe im Anschluss an die Schichtgenerierung die Randkonturen eines Teils zu belichten und zu glätten
- Der Outline-Laser fährt exakt die Randkontur ab und glättet im Ergebnis die seitlichen Flächen eines Bauteils
- Die Verwendung des Outline-Lasers kann je nach Komplexität der Kontur die Prozesszeit erheblich vergrößern
- Verbessert die mechanischen Eigenschaften durch Verringerung von Kerbstellen

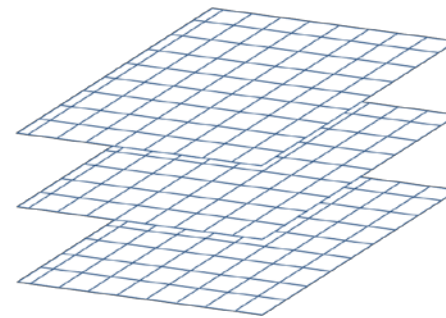
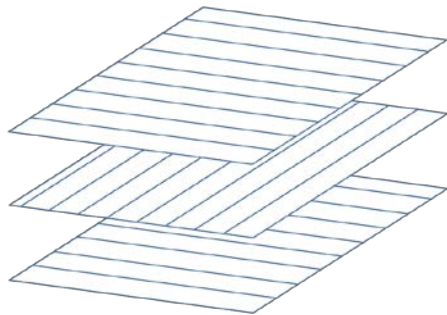
## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# SLS: BAUPROZESS



### Belichtungsstrategien

- Zur Generierung einer Schicht ist es notwendig, den Laserstrahl entsprechend der gewünschten Struktur über das Pulverbett zu führen
- Bei der Linearen Strategie verlaufen die Sinterlinien parallel zur X-/ Y-Achse:
- Bei der Kreuzstrategie kreuzen sich die Sinterlinien in jeder Schicht:

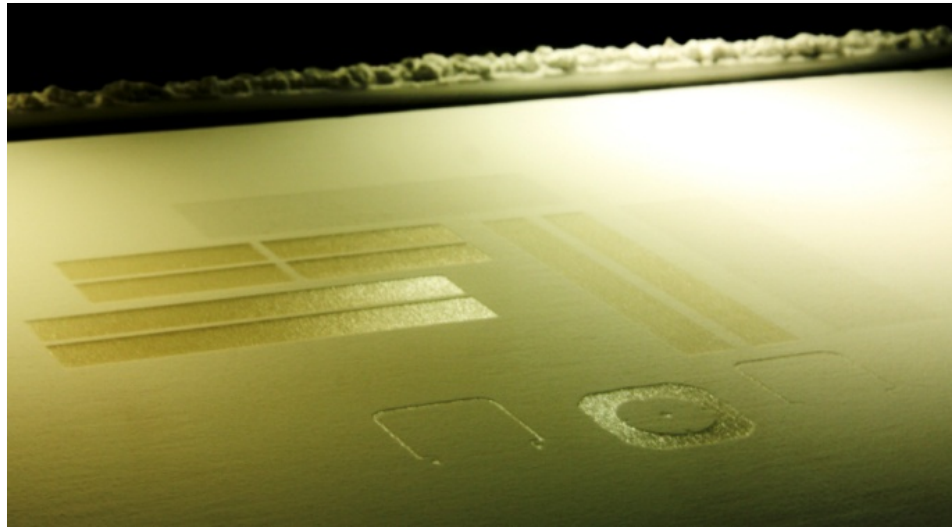


## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# SLS: BAUPROZESS



### Homogenes Schmelzbad



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# SLS: BAUPROZESS



## Oberflächengüte

- Makroskopisch sind Pulveranhaftungen und Stufungen erkennbar
- Mikroskopisch sind Pulveranhaftungen und Schmelzausläufer erkennbar
- Rauheitswerte an Seitenflächen  $R_a = 17,821 \mu\text{m}$
- Rauheitswerte an Flächen in der x - y - Ebene ca.  $R_a = 14,871 \mu\text{m}$

## Treppenstufeneffekt bei einem durch LS hergestellten Schädelmodell



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# SLS: BAUPROZESS



### Festigkeiten

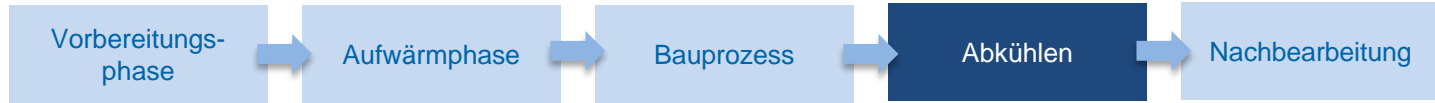
- Die Festigkeiten erreichen bis zu 95 % der Werte, die spritzgegossene Bauteile aus formal identischen Werkstoffen aufweisen.

### Beispielhafte mechanische Eigenschaften des Werkstoffes Duraform Ex

Messungen	Methode / Bedingungen	Messergebnis
Zugfestigkeit, max.	ASTM D638	48 MPa
Zugmodul	ASTM D638	1517 MPa
Zugdehnung	ASTM D638	5 %
Reißdehnung	ASTM D638	47 %
Biegefestigkeit	ASTM D790	42 MPa
Biegefestigkeit, max.	ASTM D790	46 MPa
Biegemodul	ASTM D790	1310 MPa
Härte, Shore D	ASTM D2240	74
Schlagzähigkeit (Izod gekerbt, 23°C)	ASTM D256	74 J/m
Schlagzähigkeit (Izod ungekerbt, 23°C)	ASTM D256	1486 J/m
Gardner Schlagzähigkeit	ASTM D5420	11,8 J

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# SLS: ABKÜHLEN



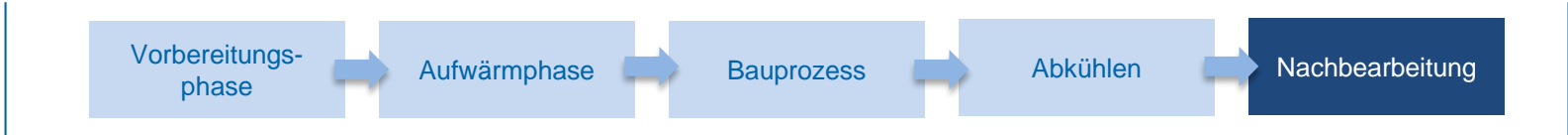
### Kontrolliertes Abkühlen verhindert Verzug

- Auftragen einer 4 -10 mm starken Pulverschicht zur Isolierung des Pulverkuchens gegen die Umgebung
- Die Pulverschicht verhindert ein schnelles Abfließen der Wärme aus dem oberen Bereich des Pulverkuchens



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# SLS: NACHBEARBEITUNG



### Entfernung der Bauteile aus dem Pulverkuchen

Beleuchtung

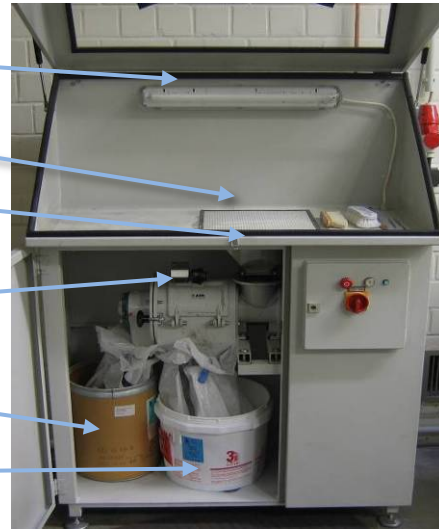
Grobsieb

Rütteltrichter

Förderschnecke  
mit Feinsieb

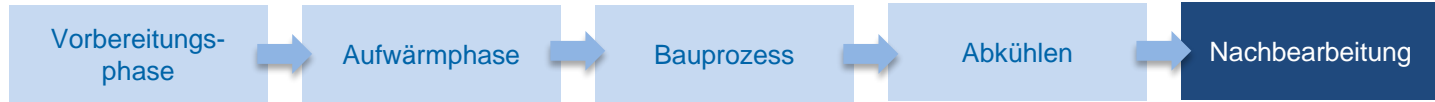
Abfallpulver

Recyclebares  
Pulver



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# SLS: NACHBEARBEITUNG



### Entfernung der Bauteile aus dem Pulveranhaftungen

- Zur weiteren Oberflächenbearbeitung kommt eine Druckstrahlkabine zum Einsatz
- Als Trägerenergie steht Druckluft (ca. 4 bar) zur Verfügung

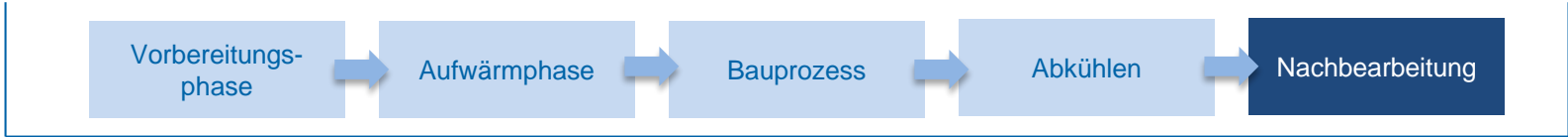
**Strahlmittel:** Glasperlen

(Weitere Materialien möglich: Sand, Keramik, Stahl, Trockeneis etc.)



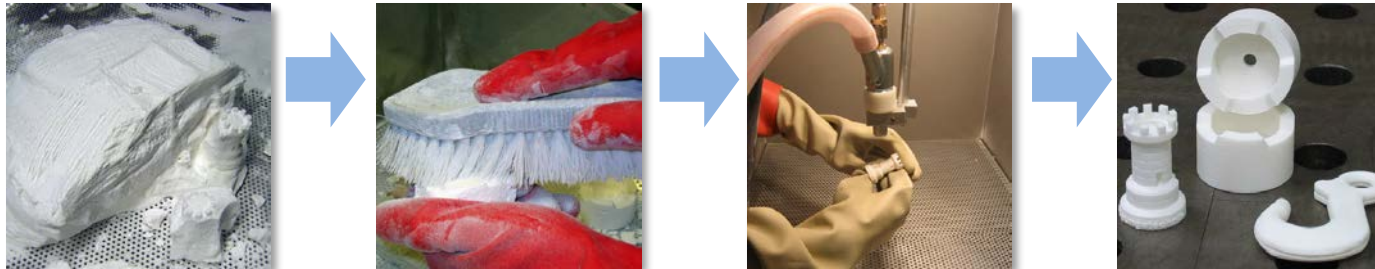
## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# SLS: NACHBEARBEITUNG



Nachbearbeitungsschritte beim Laser-Sintern führen zu zusätzlichen Kosten

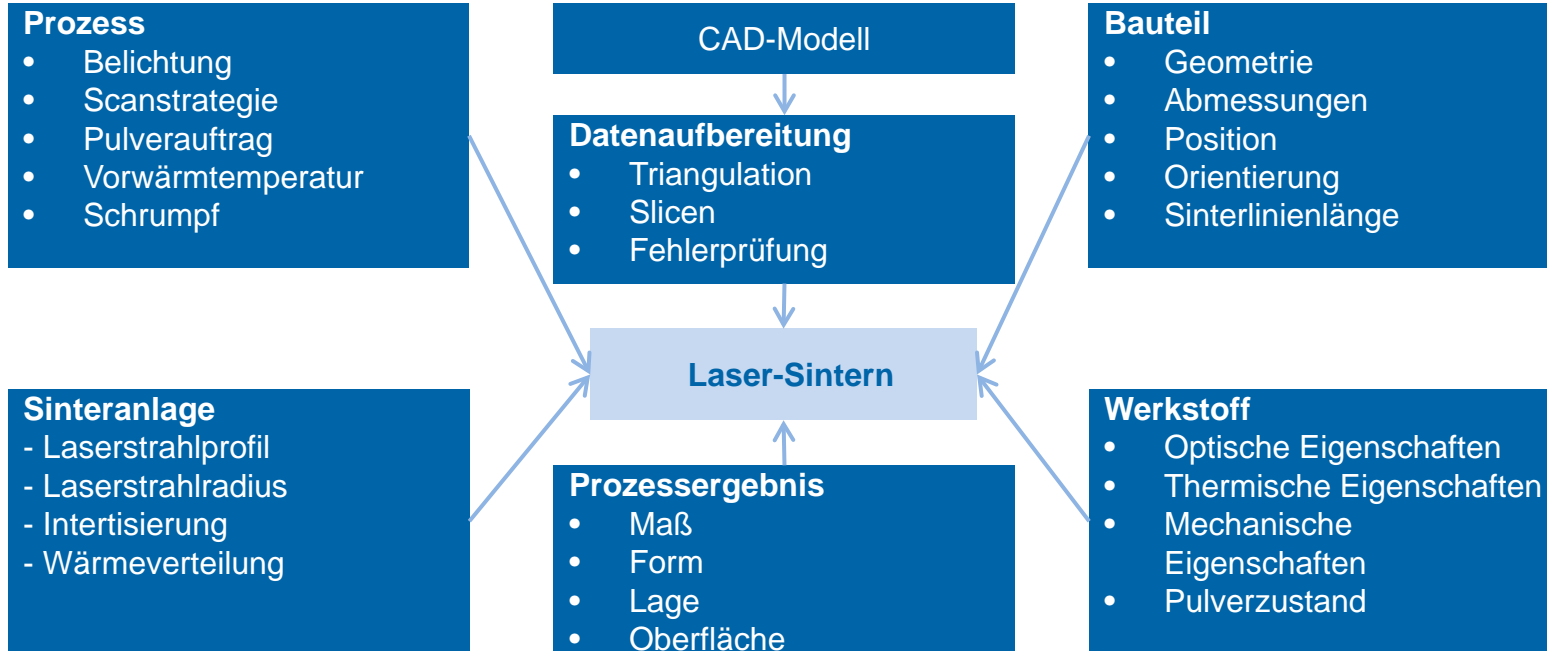
- Stückzahlen/Losgrößen
- Fertigungszeiten/Lieferzeiten
- Fertigungskosten
- Zuverlässigkeit
- Abfall- und Entsorgungskosten



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

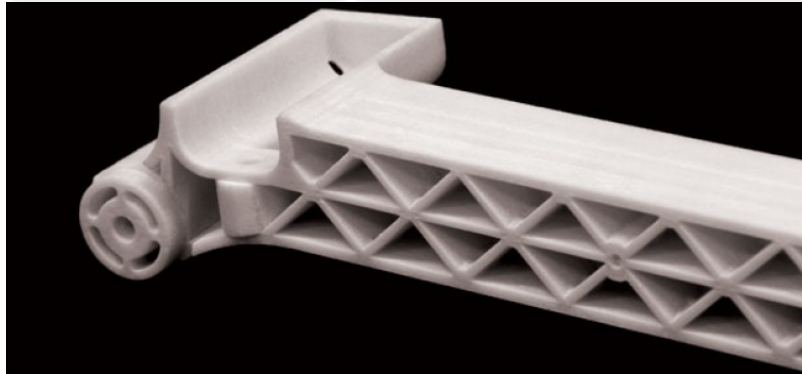
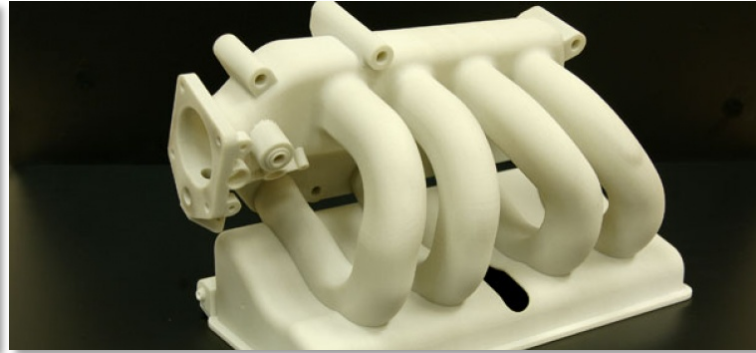
# SLS: EINFLUSSGRÖSSEN

Der Laser-Sinterprozess ist das Ergebnis des Zusammenwirkens zahlreicher Parameter, die sich gegenseitig beeinflussen:



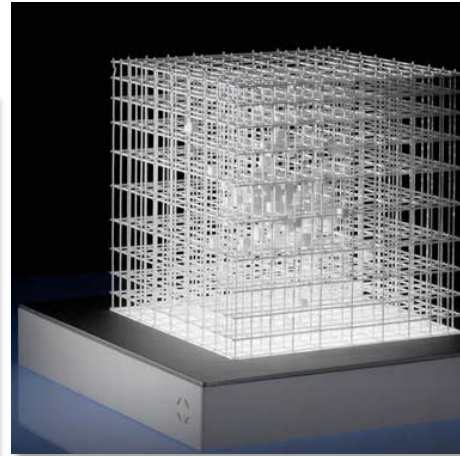
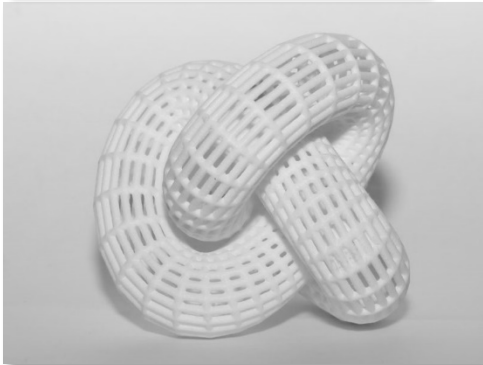
## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# SLS: PRODUKTBEISPIELE



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# SLS: PRODUKTBEISPIELE



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# SLS: VOR- UND NACHTEILE

### Vorteile

- + Keine Stützkonstruktion erforderlich (hinreichende Abstützung durch Sinterpulver)
- + Keine Bindung an spezielle Werkstoffe
- + Hohe Bauteilkomplexität erreichbar
- + Belastbare Bauteile darstellbar (Federn, Filmscharniere)
- + Thermoplastische Elastomere (TPE) möglich, dadurch Schläuche, Reifen etc. realisierbar
- + Nicht benötigtes Pulver kann zum Teil wiederverwendet werden
- + Hohe mechanische Belastbarkeit
- + Zumeist einphasiges Verfahren

### Nachteile

- Verhältnismäßig hohe Oberflächenrauheiten
- Anisotropie der Bauteileigenschaften
- Größe der Pulverteilchen limitiert Modellgenauigkeit
- Nicht zum Modell gehörige Randbereiche können mit verkleben (aufgrund der eingebrachten Wärmeenergie)
- Inertgasatmosphäre zur Vermeidung von Oxidation während des Sinterns erforderlich
- Vorheizen des Pulver erforderlich (zeitintensiv)

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# SLS: ANLAGEN

<b>Anlagentyp:</b>	EOS P 810
<b>Hersteller:</b>	EOS GmbH
<b>Baujahr:</b>	seit 2018
<b>Bauraum:</b>	700 mm x 380 mm x 380 mm
<b>Schichtdicke:</b>	typischerweise 0,12 mm
<b>Laser:</b>	2 x CO <sub>2</sub> -Laser mit einer Leistung von 70 W
<b>Scan- geschwindigkeit:</b>	2 x 6000 mm/s



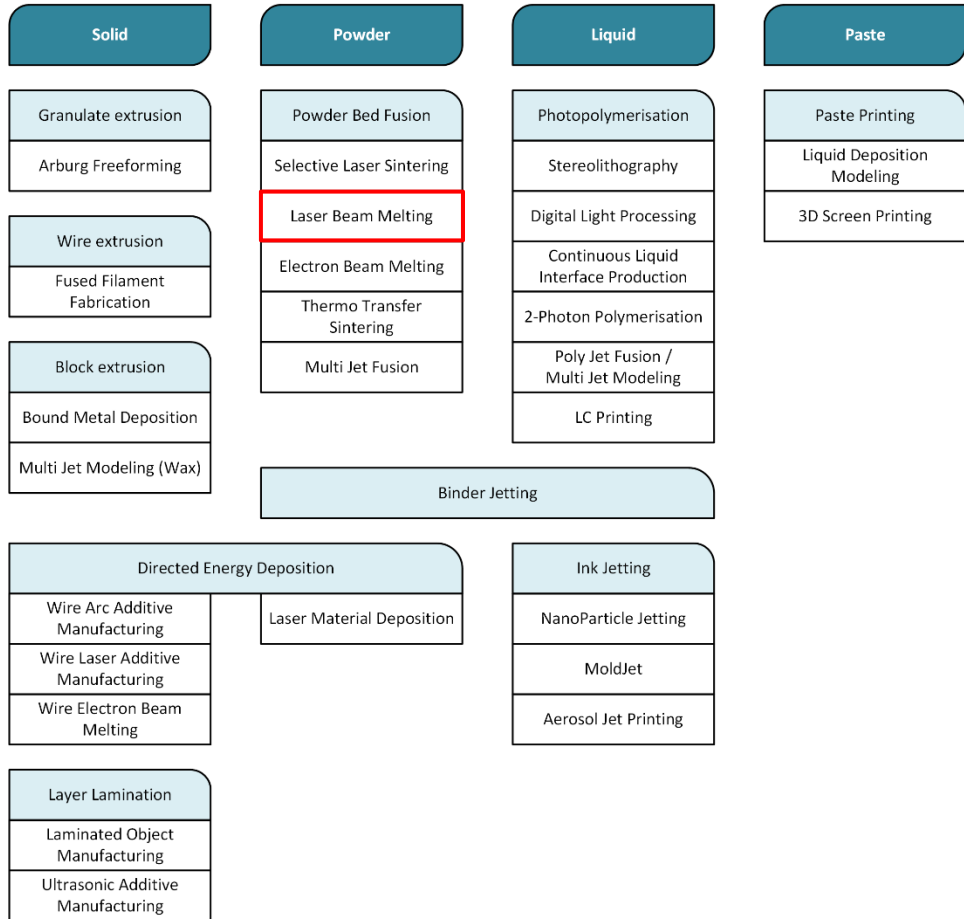
## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# SLS: ANLAGEN

<b>Anagentyp:</b>	Lisa Pro
<b>Hersteller:</b>	SINTERIT (Polen)
<b>Baujahr:</b>	seit 2018
<b>Bauraum:</b>	150 mm x 200 mm x 260 mm
<b>Schichtdicke:</b>	0,075-0,175 mm
<b>Laser:</b>	IR Diodenlaser mit einer Leistung von 5 W
<b>Scan- geschwindigkeit:</b>	mechanische Bewegung auf Achsen

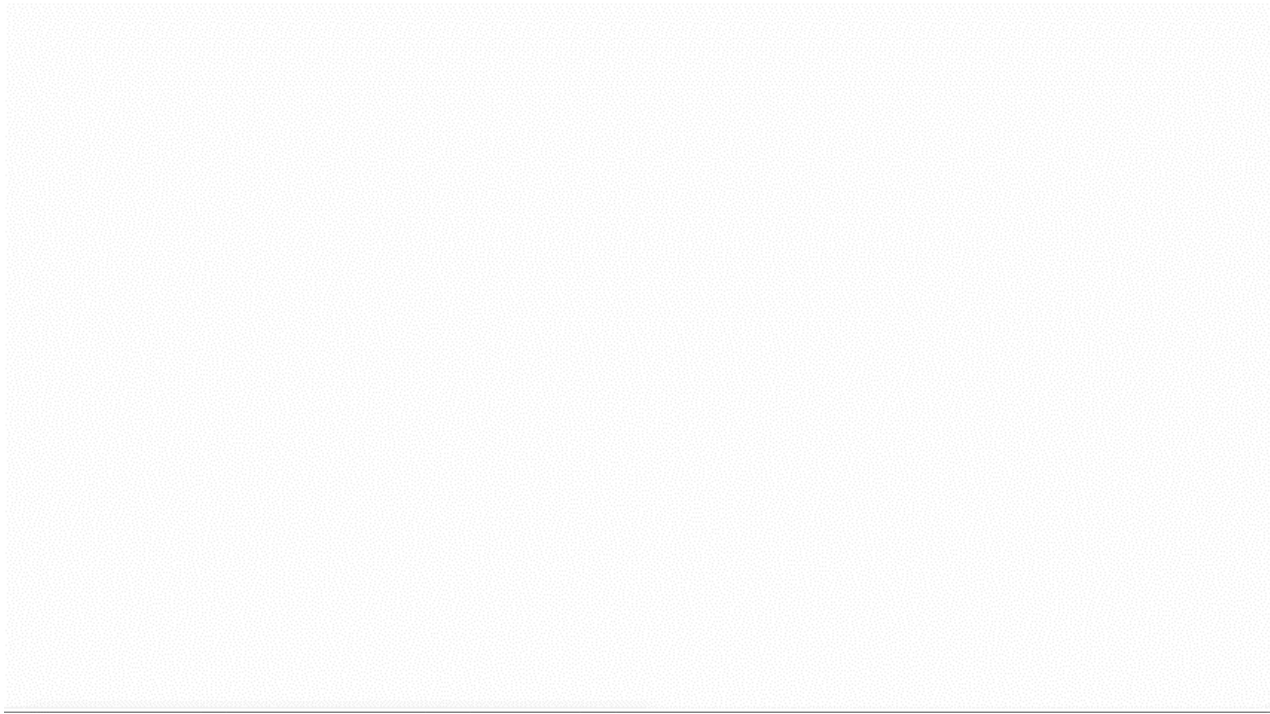


# LASER BEAM MELTING



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LASER BEAM MELTING – VIDEO



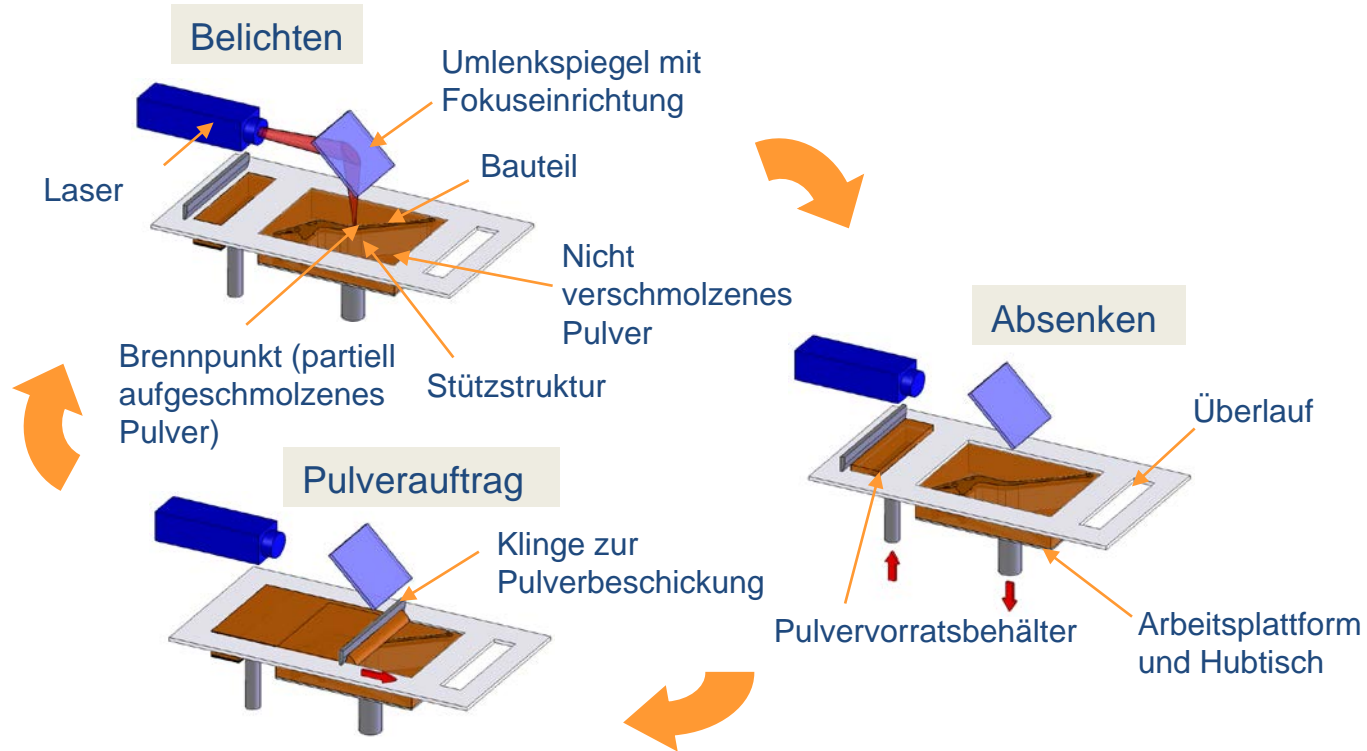
## 6 Additive Fertigungsverfahren – Powder bed fusion

# LBM: KURZBESCHREIBUNG

<b>Bauprozess</b>	Schicht-für-Schicht-Bauprozess durch lokales Aufschmelzen pulverförmigen Materials mittels Laser und Verschmelzen (Verschweißen) beim Erstarren
<b>Ausgangsmaterial</b>	pulverförmig; in der Regel Metalllegierungen
<b>Bindungsmechanismus</b>	Physikalisch (thermisch)
<b>Vorgehen bei Materialverarbeitung</b>	Vektororientiert
<b>Aktivierungsenergie</b>	Thermische Energie der Laserstrahlung
<b>Postprozess</b>	Stützkonstruktion entfernen; Verbesserung der Oberfläche durch Folgetechnologien

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: VERFAHRENSABLAUF



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

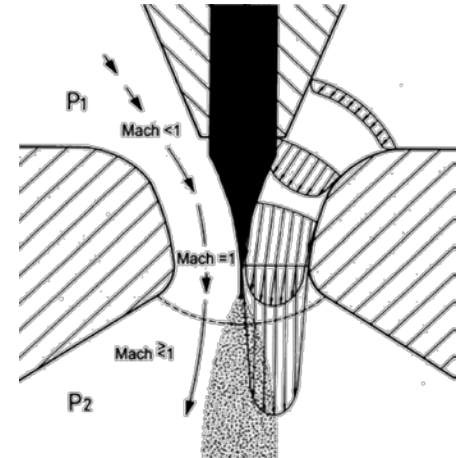
# LBM: METALLPULVERHERSTELLUNG

### Inertgasverdüsung

- Verwendung bei:
  - Oxidationsempfindliche Werkstoffe // Hochreine Pulver aus Sonderstahl // Superlegierungen // hochlegierte Werkstoffe

### Lavaldüse

- Erzeugung von feinkörnigen, kugeligen, schnell abgekühlten Pulvern
- Mittlerer Teilchendurchmesser  $d_{50} = 10 - 80 \mu\text{m}$
- Vergleichsweise enge Korngrößenverteilung

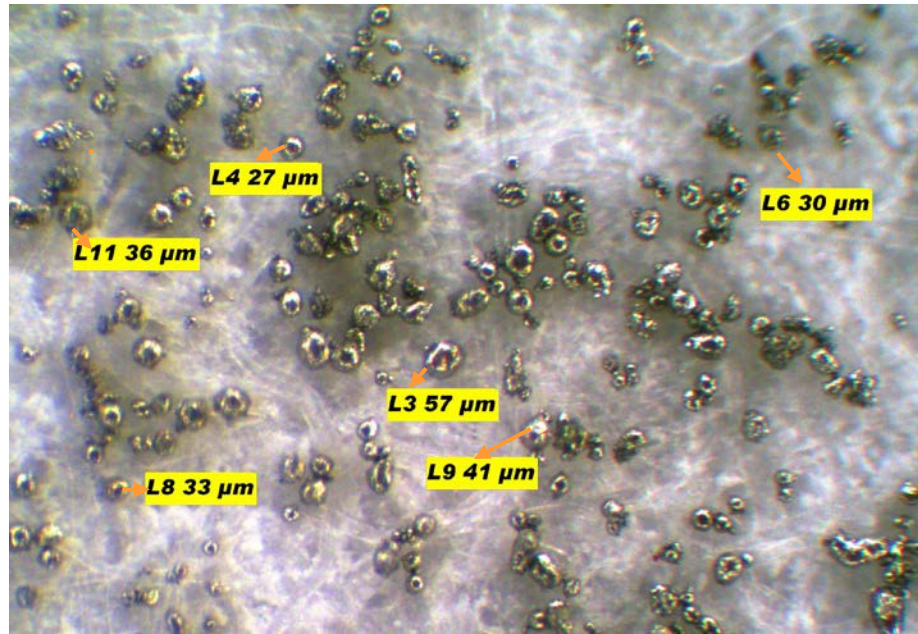


## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: METALLPULVERHERSTELLUNG

### Pulvermerkmale

- Durchmesser der sphärischen Pulverpartikeln liegt je nach Anlagenparameter zwischen 10 µm und 80 µm

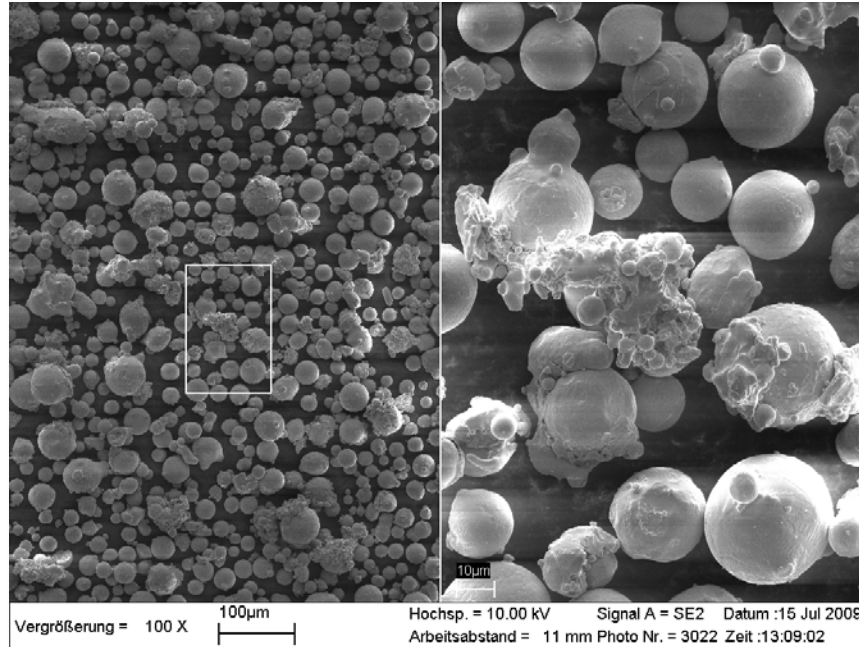


## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: METALLPULVERHERSTELLUNG

### Pulvermerkmale

- Beim Verdüsen kann es zu „Verklebungen“ zwischen einzelnen Pulverkörnern kommen



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: KOMMERZIELL VERFÜGBARE MATERIALIEN

Produktklasse	Werkstoff-Typ	Typische Anwendungen
<b>Martensit-aushärtender Stahl</b>	18 Mar 300/1.2709	Serien-Spritzgusswerkzeuge; Maschinenbauteile
<b>Edelstahl</b>	Edelstahl 17-4/1.4542	Funktionsprototypen und Serienteile; Maschinenbau und Medizintechnik
	härtbarer Edelstahl 15-5/1.4540	Funktionsprototypen und Serienteile; Maschinenbau und Medizintechnik
	1.4404/UNS S31673	Lifestyle: Schmuck, Funktionselemente in Yachten, Brillenfassungen etc. Luft -und Raumfahrt: Stützbauteile, Klammern etc. Medizin: Funktionsprototypen und Serienteile in z. B. Endoskopie und Orthopädie
<b>Nickel-Legierung</b>	Inconel™ 718, UNS N07718, AMS 5662, W.Nr 2.4668	Funktionsprototypen und Serienteile; hochtemperaturbeständige Turbinenbauteile
	Inconel™ 625, UNS N06625, AMS 5666F, W.Nr 2.4856	Funktionsprototypen und Serienteile; hochtemperaturbeständige Turbinenbauteile
	UNS N06002	Bei anspruchsvollen Temperaturbedingungen und hohem Oxidationsrisiko, z. B. Verbrennungskammern, Nachverbrennern und Abgasrohren in Gasturbinen (Luftfahrt u. am Boden), Flügelrädern, Rollenherden und Ausbauelementen für industrielle Öfen

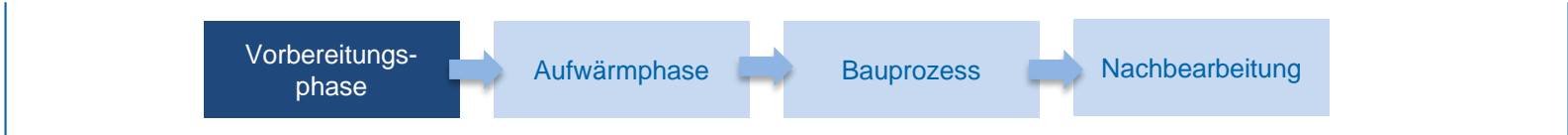
## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: KOMMERZIELL VERFÜGBARE MATERIALIEN


Produktklasse	Werkstoff-Typ	Typische Anwendungen
<b>Kobalt-Chrom</b>	CoCrMo Superlegierung, UNS R31538, ASTM F75	Funktionsprototypen, Serienteile, Maschinenbau, Medizintechnik, Dental
	CoCrMo Superlegierung	Dental-Restaurationen (Serienfertigung)
<b>Titan</b>	Ti6Al4V Leichtmetall	Funktionsprototypen und Serienteile; Luft- und Raumfahrt, Motorsport etc.
	Ti6Al4V ELI	Funktionsprototypen und Serienteile in der Medizintechnik
<b>Aluminium</b>	AlSi10Mg Leichtmetall	Funktionsprototypen und Serienteile; Maschinenbau, Motorsport etc.
<b>Kupfer</b>	CuCrZr	Raketentriebwerke
	CuNi2SiCr	Wärmetauscher
<b>Wolfram</b>	W	Scatter Grind - Medizintechnik

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: VORBEREITUNGSPHASE



### Anlagenkomponenten

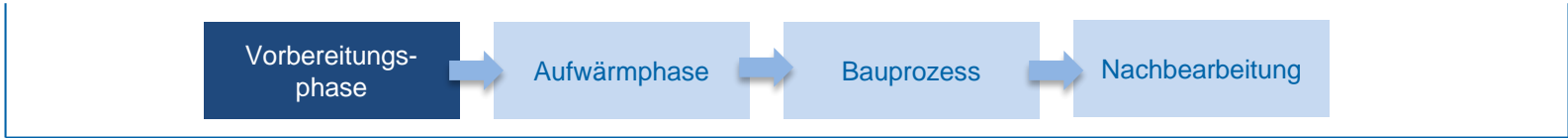


Quelle:  
MTT Technologies GmbH

<p><b>Einheit zur automatischen Pulveraufbereitung und -rückführung</b></p>
<p><b>Bauprozesskammer</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bauplattform</li> <li>• Laser</li> <li>• Pulverauftragsmechanismus</li> <li>• Scaneinheit</li> </ul>
<p><b>Steuerungstechnik</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Laser</li> <li>• Scaneinheit</li> <li>• Prozessgas</li> <li>• Pulverauftrag</li> <li>• Pulverrückführung</li> </ul>
<p><b>Behälter zur Pulverbevorratung</b></p>

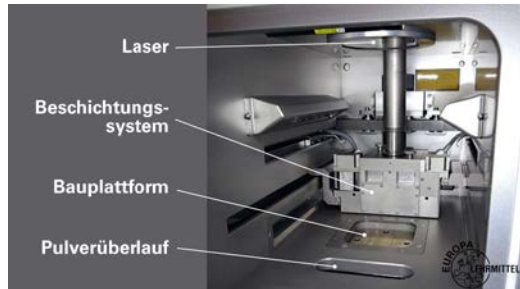
## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: VORBEREITUNGSPHASE



### Anlagenkomponenten im Baurauminneren

- Beheizbarer, evakuierter und unter Schutzgas prozessgeführter Bauraum, in dem Teile gefertigt werden
- Beschichtungssystem zum Aufbringen und Ebenen der Pulverschichten
- Beschichterbefüllung zur Pulverversorgung der Pulverauftragskomponente
- Pulverabsaug- und -zuführsystem
- Evtl. integrierte Handschuheingriffe zum Entnehmen der Bauteile aus der Prozesskammer



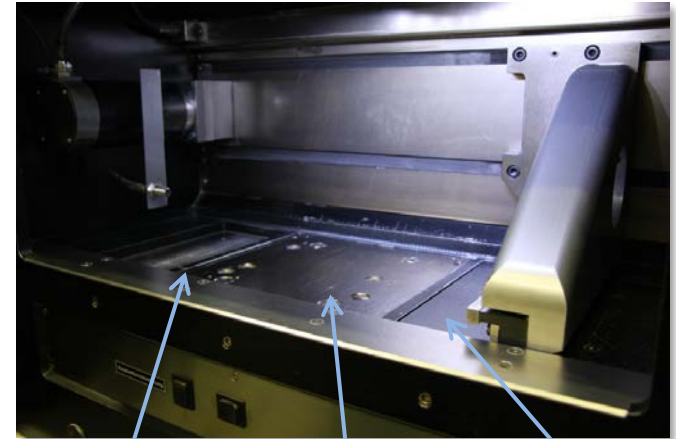
## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: VORBEREITUNGSPHASE



### Einrichten der Maschine

- Einsetzen und Verschrauben der Bauplattform
- Befüllung des Vorratsbehälters mit dem Werkstoff
  - Nach jedem Bauprozess muss das Pulver neu gesiebt werden, um Spratzer oder oxidierte Pulverpartikel zu entfernen
- Inertisierung des Bauraums mit Stickstoff, Argon,...
  - Vermeidung von evtl. Pulverexplosionen
  - Oxidation und eine damit einhergehende unansehnliche Verfärbung und Veränderung der mechanischen Eigenschaften kann verhindert werden



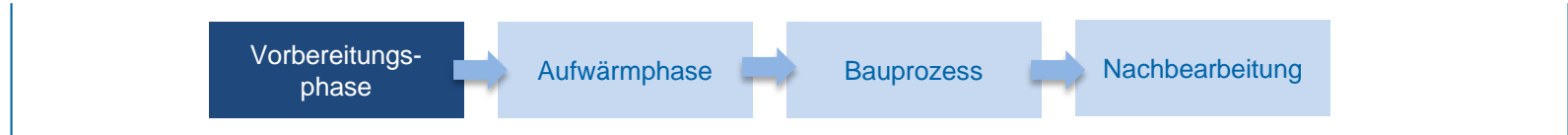
Überlaufbehälter

Vorratsbehälter

Bauplattformträger

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: VORBEREITUNGSPHASE



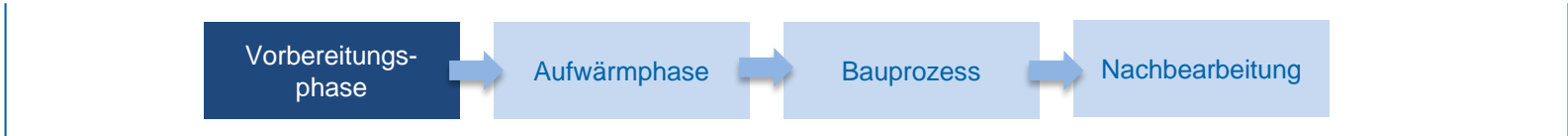
### Stützkonstruktionen

- Bei der additiven Fertigung von Metallbauteilen sind hohe Temperaturen notwendig
  - Hoher Schmelzpunkt bei Metallen
  - Hohe Laserleistung im Vergleich zu Kunststoffverfahren
- Hohe Temperaturgradienten von bis zu  $7 \times 10^6$  K/s
  - Hohe Eigenspannung im Bauteil
  - Hoher Verzug



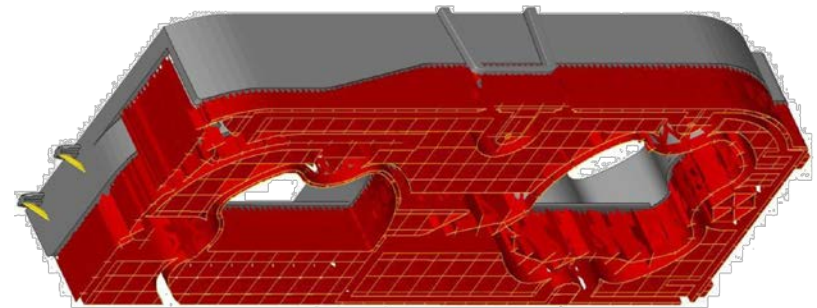
## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: VORBEREITUNGSPHASE



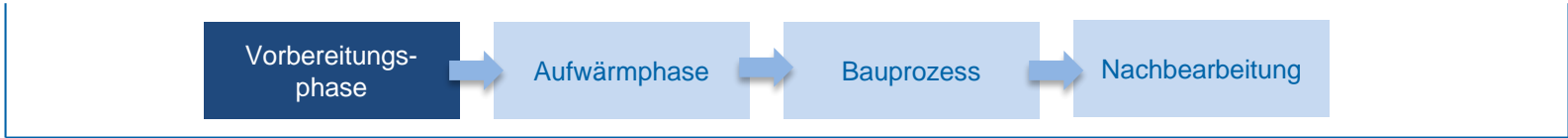
### Die Erzeugung der Stützkonstruktionen wird in 5 Schritten durchgeführt

- Festlegung der Supporterzeugungsparameter in den Maschineneigenschaften (dieser Schritt muss nicht jedes Mal ausgeführt werden, wenn funktionierende Parameter gefunden und gespeichert sind)
- Automatische Supporterzeugung auf Basis der hinterlegten Parameter
- Manuelle Anpassung der automatisch erzeugten Supports
- Graphische Bearbeitung und Kontrolle des Supports in 2D und 3D
- Sichern und Exportieren der Supportstrukturen



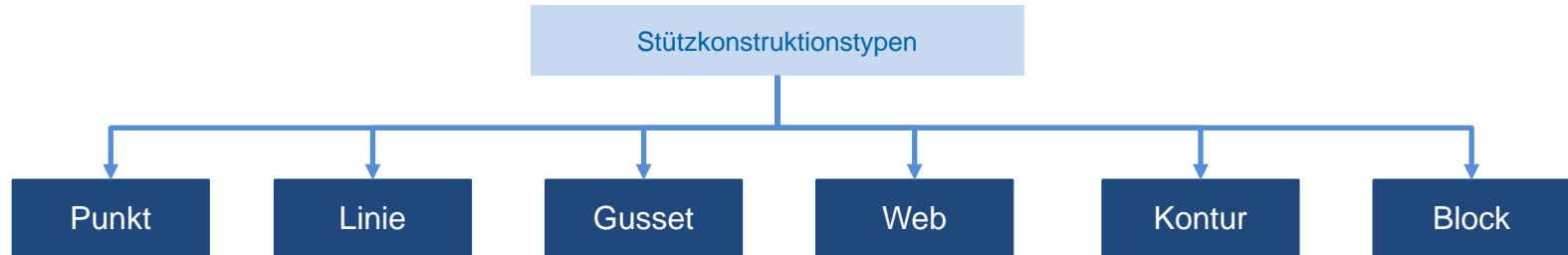
## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: VORBEREITUNGSPHASE



### Auswahl der Stützkonstruktionen

- Alle aktiven Stützkonstruktionstypen werden bei der automatischen Erzeugung berücksichtigt

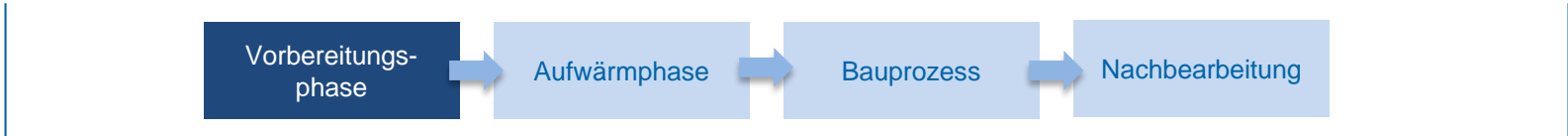


### Auswahl der Oberflächen

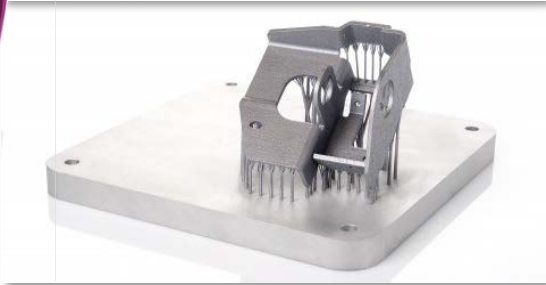
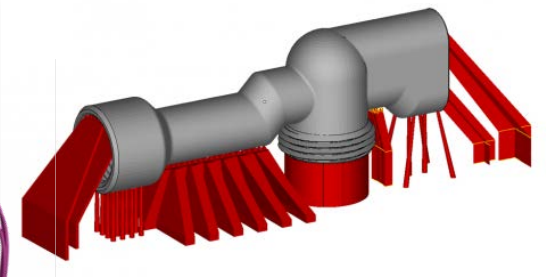
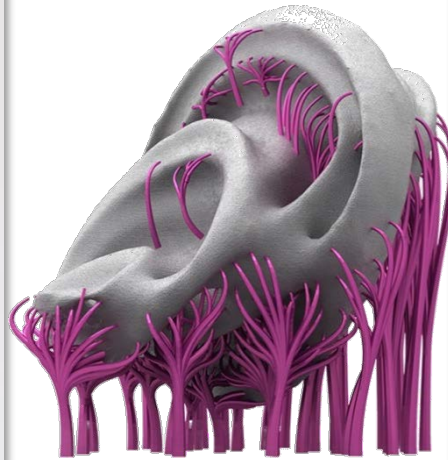
- Auswahlwinkel: Flächen mit einem steileren Winkel werden als selbsttragend eingestuft
- Filter: Oberflächenfilter, Unbeschränkter Oberflächenfilter, Spitze Kanten-Filter
- Maximale Höhe

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: VORBEREITUNGSPHASE



### Sonderformen an Stützkonstruktionen



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: AUFWÄRMPHASE



- Erwärmung der Substratplatte auf 80 °C (EOSINT M 290)
- Je nach Anlagentyp Erwärmung der Bauplattformheizung auf  $\approx 400$  °C möglich

### Die Beheizung der Bauplattform hat Einfluss auf:

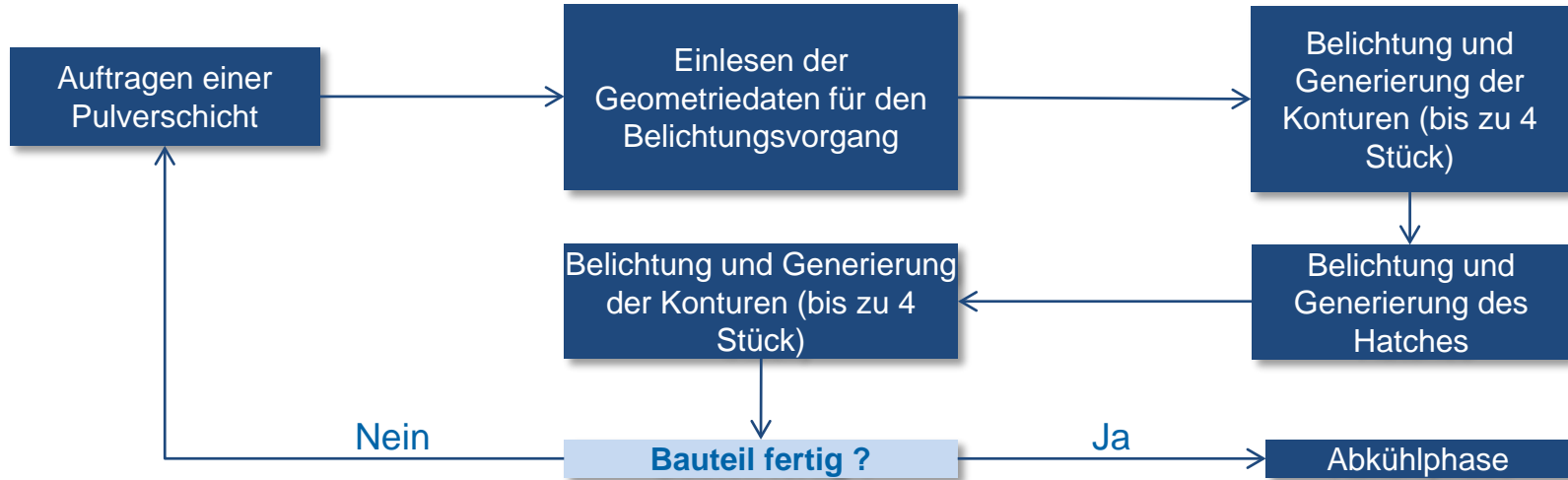
- Mechanischen Eigenschaften der generierten Bauteile
- Verzug und somit Maßgenauigkeit
- Oberflächenqualität
- Gefügebildung

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: BAUPROZESS



### Prinzipielles Schema zur Schichtgenerierung

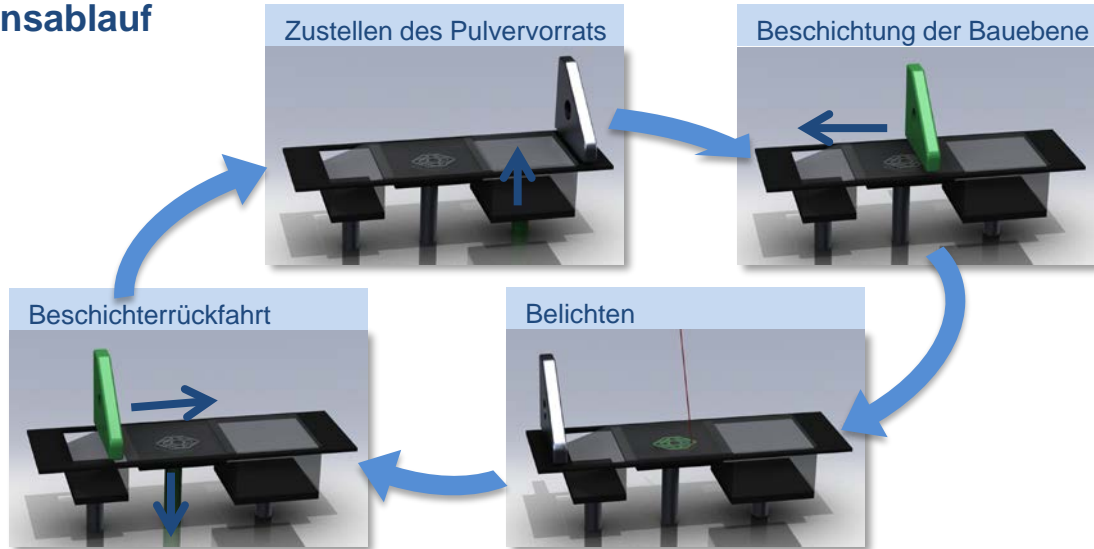


## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: BAUPROZESS



### Verfahrensablauf



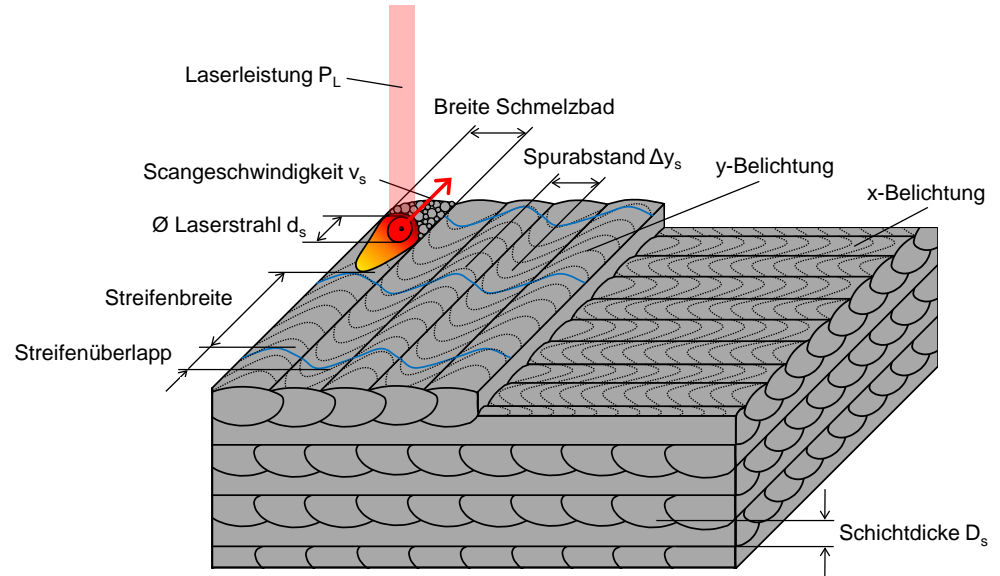
## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: BAUPROZESS



### Aufschmelzverhalten

- Anlagenparameter sind so zu wählen, dass ein vollständiges Aufschmelzen erfolgt
- Durch Wärmeleitung erstarrt das Material und erzeugt somit eine feste Verbindung mit der darunter liegenden Schicht



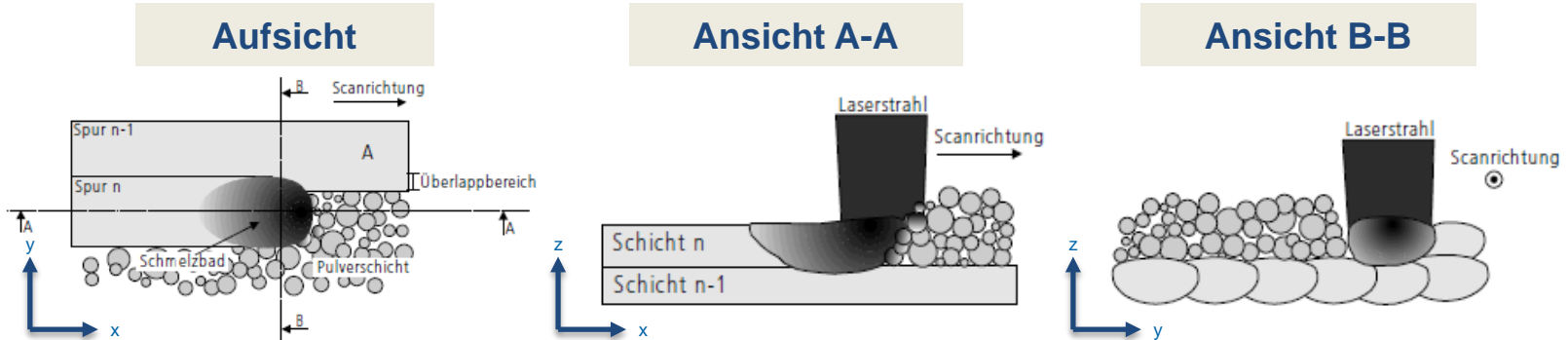
## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: BAUPROZESS



### Realisierung einer idealen metallurgischen Verbindung

- Alle Pulverpartikel in der Wechselwirkungszone müssen aufgeschmolzen werden
- Bereits erstarrte Nachbarschicht muss erneut aufgeschmolzen werden
- Oberfläche der darunterliegenden Schicht muss teilweise aufgeschmolzen werden



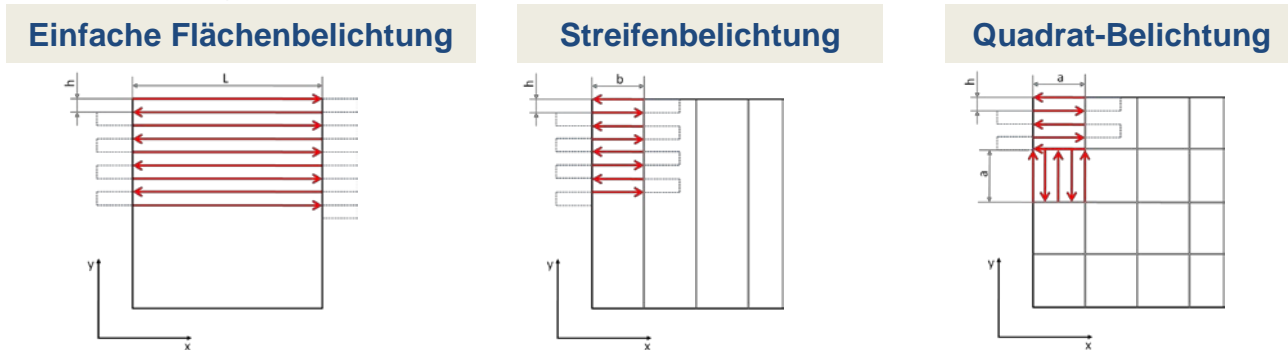
## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: BAUPROZESS



### Scanstrategien

- Unterschieden wird zwischen
  - Flächenbelichtung (Laser an)
  - Leerlauf (Laser aus)
  - Konturbelichtung



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

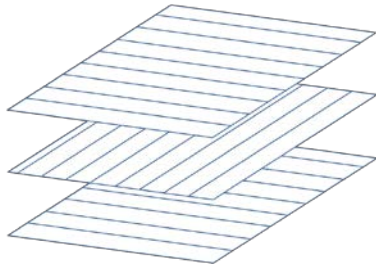
# LBM: BAUPROZESS



### Scanstrategien

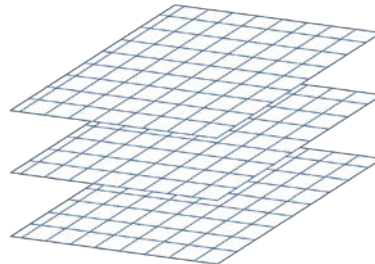
- Kompensation von anisotropen Gefügeausbildungen
- Symmetrische Verteilung der Schwindungs- und Spannungseffekte

**Alternierende Belichtung**



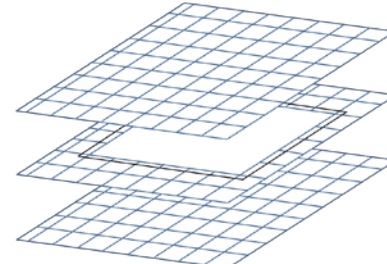
Einfache Schichtbelichtung

**x-y-Belichtung**



Doppelte Schichtbelichtung

**Hülle-Kern-Belichtung**



Hülle jede Schicht  
Kern jede zweite Schicht

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: BAUPROZESS



### Gefüge

- Im Bauprozess werden einzelne Spurbreiten von Material verschmolzen, bildlich werden hier mehrere dichtgepackte Schweißnähte erzeugt, man spricht hier auch vom Mikroschweißen
- Schichtdicken beim Strahlschmelzen bewegen sich i. d. Regel zwischen 0,02 mm - 0,06 mm

#### Schliff in Bauebene

(Material Hastelloy X)



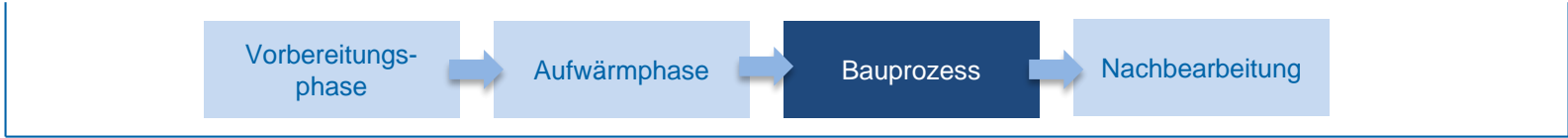
#### Schliff senkrecht zur Bauebene

(Material Hastelloy X)



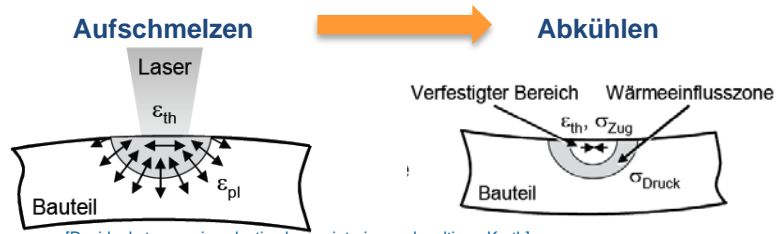
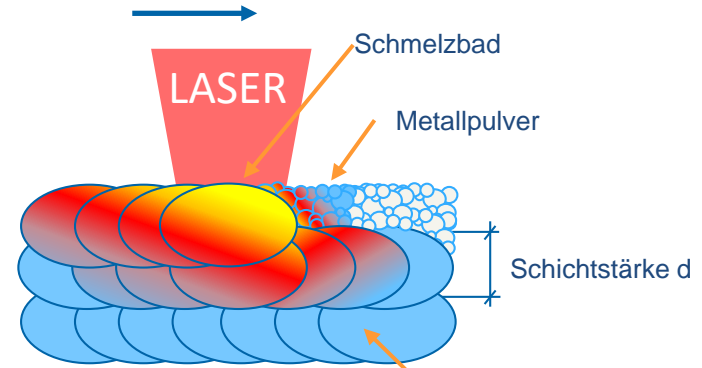
## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: BAUPROZESS



### Entstehung von Eigenspannungen

- Prozessbedingt schnelle Abkühlung des aufgeschmolzenen Metallpulvers (Ca.  $7 \times 10^6$  K/s)
- Temperature Gradient Mechanism (TGM)
  - Örtliche inhomogene, elastische und plastische Verformungen
  - Ausprägung von Zug- und Druckspannungen



- $\epsilon_{th}$  : Thermische Dehnung
- $\epsilon_{pl}$  : Plastische Dehnung
- $\sigma_{Druck}$  : Druckspannungen
- $\sigma_{Zug}$  : Zugspannungen

[Residual stresses in selective laser sintering and melting - Kruth]

Quelle: MTT Technologies GmbH

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

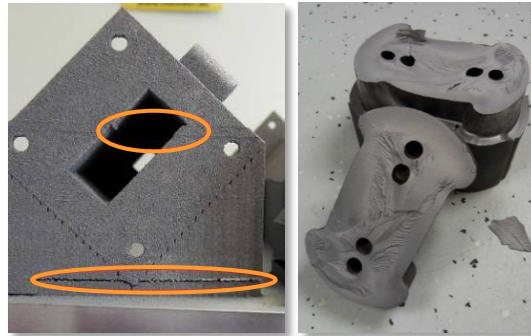
# LBM: BAUPROZESS



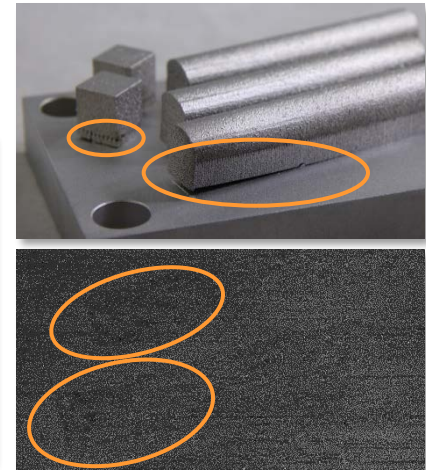
Prozessfehler resultierend aus Eigenspannungen

- Gefährdung der Prozessstabilität
- Gefahr des Bauteilversagens im Belastungszustand
- Verminderte Maßhaltigkeit

Risse in Support und/oder Bauteil



Delamination der Supportanbindung



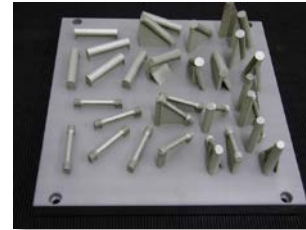
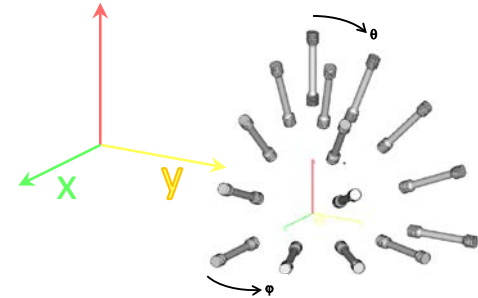
## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: BAUPROZESS



### Anisotropie

- Anisotrope mechanische Eigenschaften bei strahlgeschmolzenen Bauteilen
  - Anisotropie: Richtungsabhängigkeit einer Eigenschaft.
  - Je nach Orientierung der Bauteile im Bauprozess ergeben sich unterschiedliche Festigkeiten
- Üblicherweise beste Festigkeitswerte bei einem Polarwinkel von  $\Phi = 90^\circ$  (entspricht der Bauebene)
  - Weniger Schichten
  - Besserer metallurgischer Zusammenhalt innerhalb einer Schicht als zwischen den Schichten



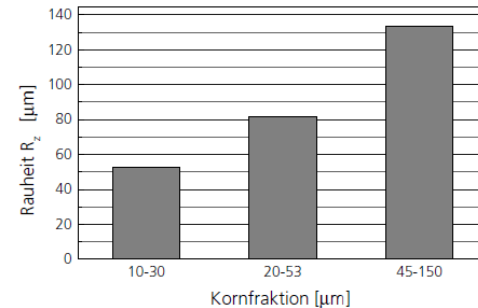
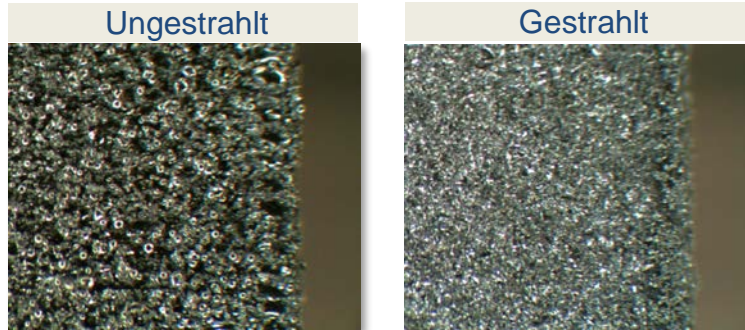
## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: BAUPROZESS



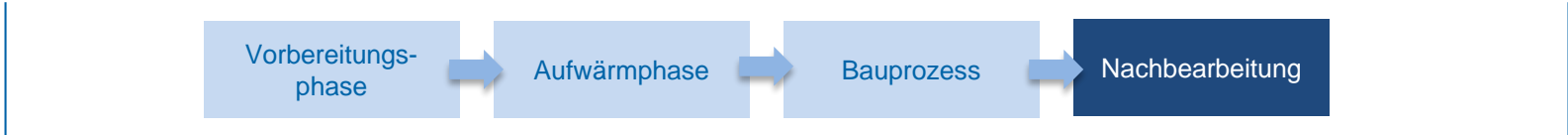
### Oberflächengüte

- Wie beim Laser-Sintern Probleme mit Pulveranhaftungen und Schmelzausläufern
- Im Vergleich zu konventionell hergestellten Bauteilen schlechte Oberflächenqualität bzw. Rauheitswerte
- Verbesserung der Oberflächenqualität im Postprocessing notwendig



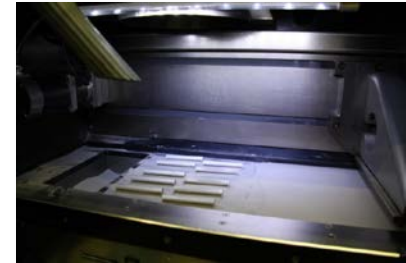
## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: BAUPROZESS



### Notwendige Nachbearbeitungsschritte

1. Nicht verschmolzenes Pulver wird entfernt
2. Bauplattform wird dem Prozessraum entnommen
3. Bauteile werden von der Bauplattform abgetrennt
4. Verbleibende Supportstrukturen müssen mechanisch (i. d. R. durch manuelles Abtrennen mit Hammer und Meißel, Sägen,) entfernt werden
5. Pulveranhaftungen werden durch Strahlen entfernt



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: ANWENDUNGSBEISPIELE

Werkzeugeinsatz mit kontur-  
angepassten Kühlkanälen



Komplexe  
mechanische  
Funktionsteile



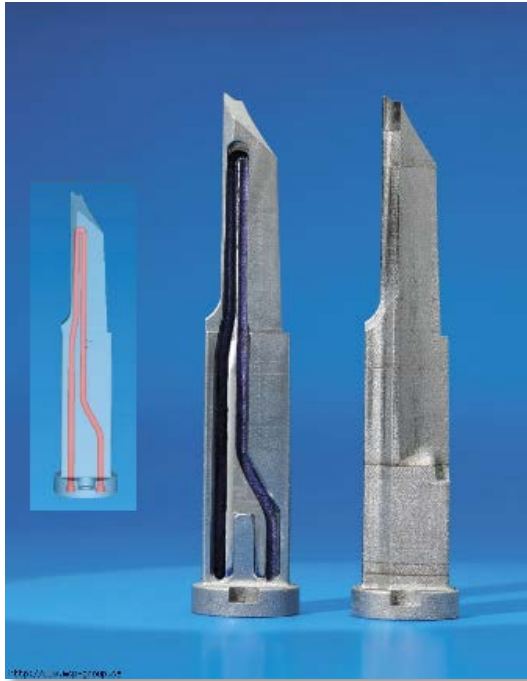
Individualteile, z. B. Knieimplantate



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: ANWENDUNGSBEISPIELE

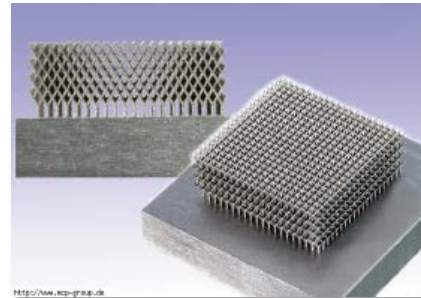
Konturnah gekühltes Bauteil



Turbinenschaufeln



Gitterstruktur



## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: ANWENDUNGSBEISPIELE



Quelle: MTT Technologies GmbH

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: VOR-/ NACHTEILE

### Vorteile

- ➕ Fertigung direkter Metallbauteile
- ➕ Herstellung von Funktionsmodellen
- ➕ Zumeist einphasiges Verfahren
- ➕ Wiederverwendung des nicht genutzten Materials

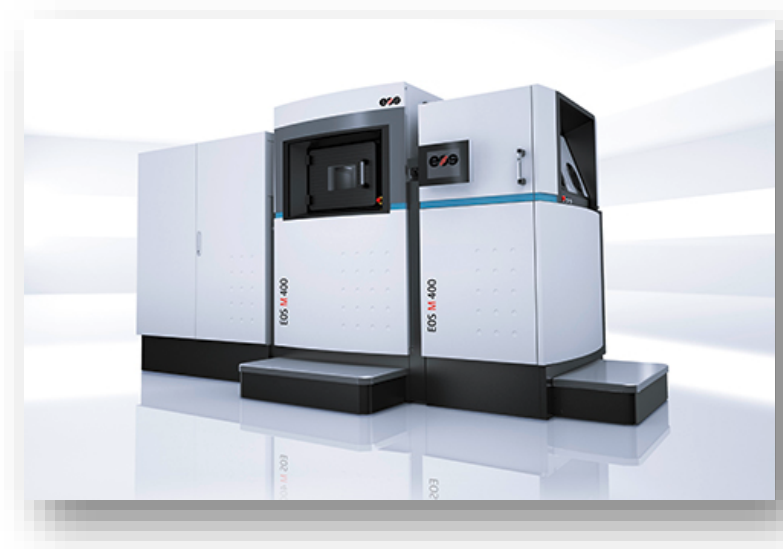
### Nachteile

- ➖ Anisotrope mechanische Eigenschaften
- ➖ Stützkonstruktionen erforderlich
- ➖ Aufwendige Nachbearbeitung notwendig
- ➖ Inertgas notwendig
- ➖ Niedrige Oberflächengüte
- ➖ Hohe Energiekosten
- ➖ Hohe Eigenspannung bei metallischen Bauteilen

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# LBM: ANLAGEN

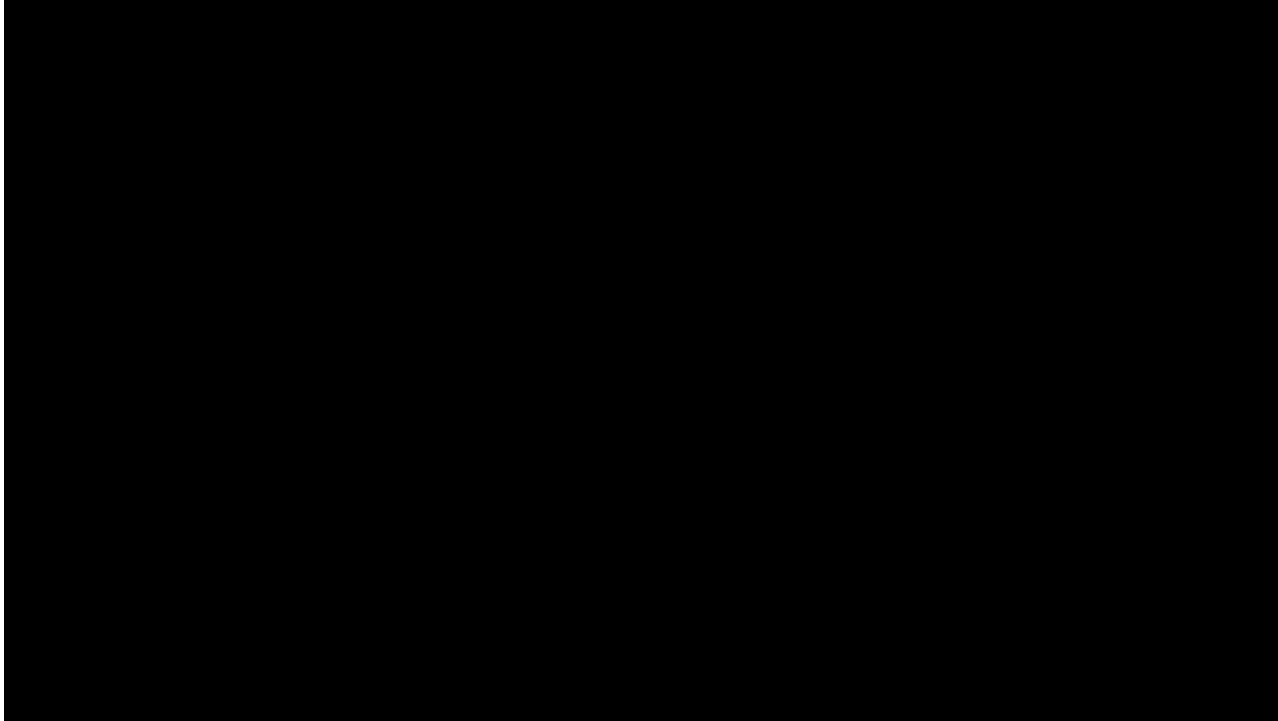
<b>Anlagentyp:</b>	EOS M 400
<b>Hersteller:</b>	EOS GmbH
<b>Bauraum:</b>	400 mm x 400 mm x 400 mm
<b>Schichtdicke:</b>	20 - 100 µm
<b>Baufortschritt:</b>	2 -20 mm <sup>3</sup> /s
<b>Laser:</b>	Yb-Faserlaser; 1 kW
<b>Abmessungen:</b>	4.181 mm x 1.613 mm x 2.355 mm



Quelle: www.eos.de

## 2.1 Urformen – Additive Fertigung

# VIDEO – KOMBINATION AM - SM





Additive Fertigung

# FERTIGUNGSTECHNIK 20/21 - 05

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

