

# FERTIGUNGSTECHNIK



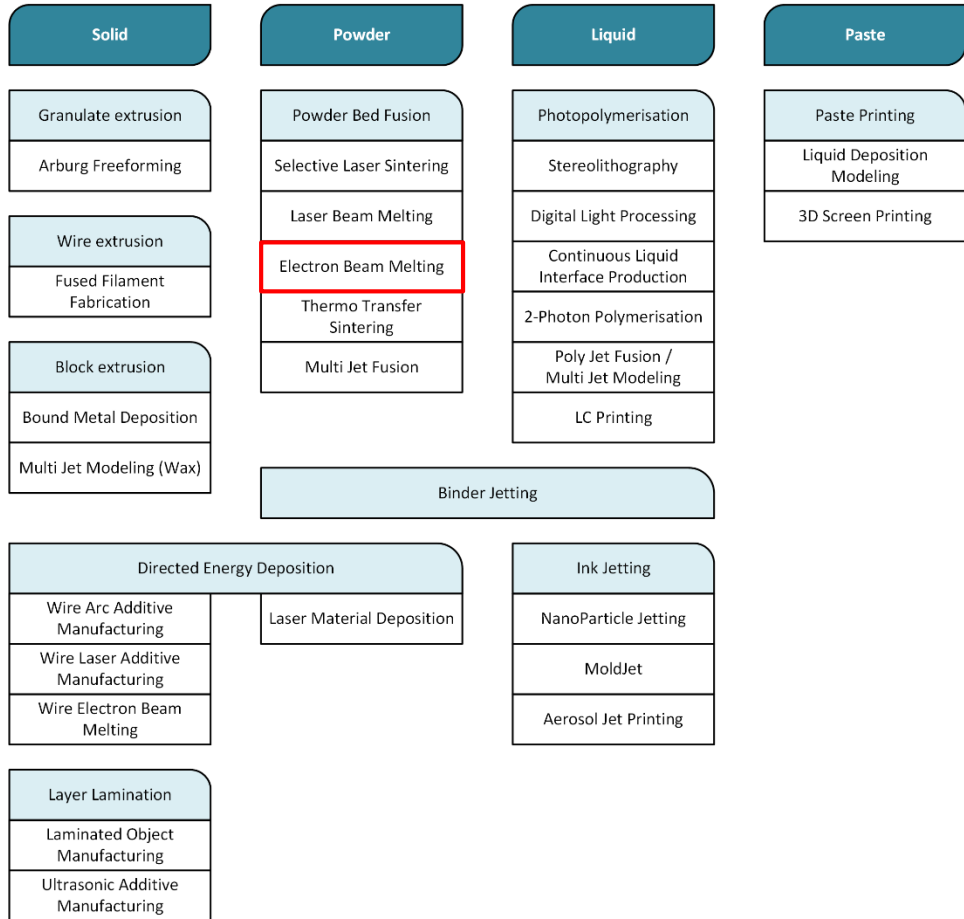
Wintersemester 2020/21

# 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		

## 2.1 Urformen

# ELECTRON BEAM MELTING



# ELEKTRONEN-STRAHLSCHMELZEN

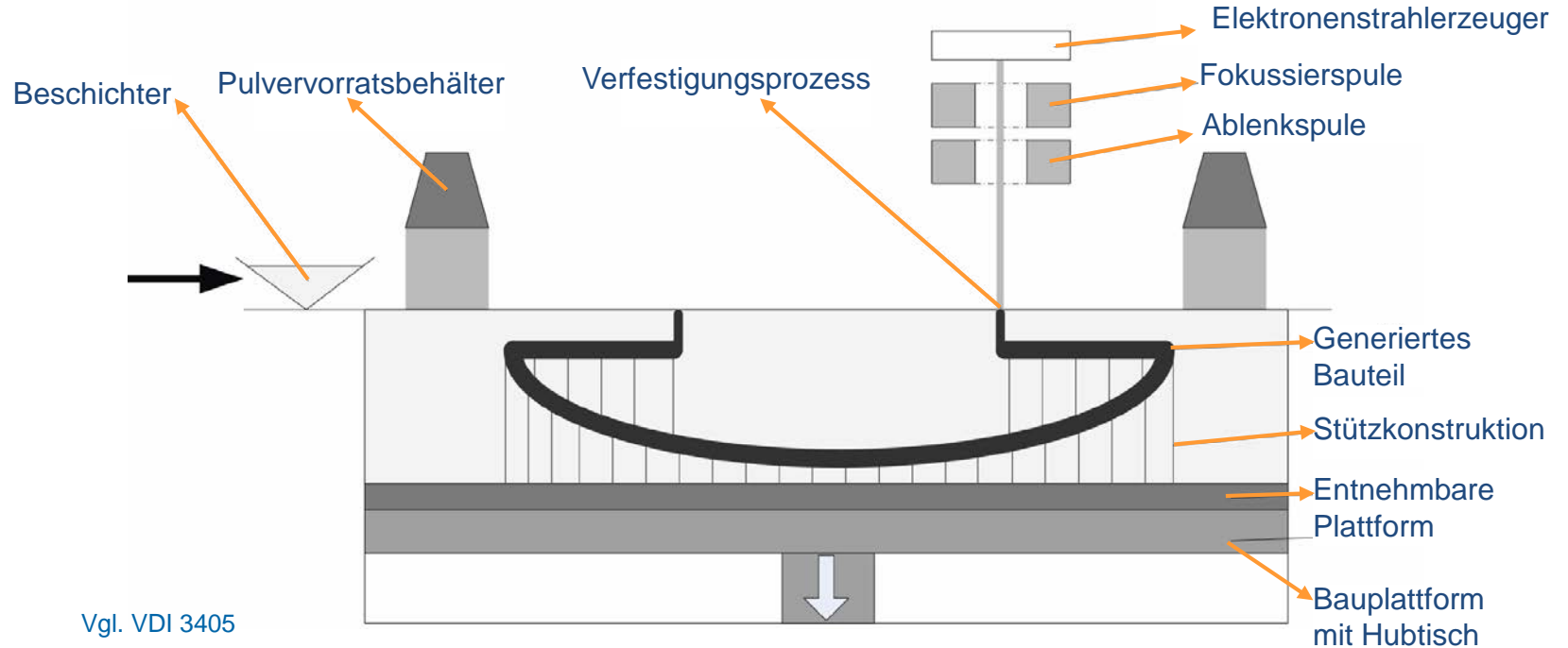


## 2.1 Urformen

**EBM: KURZBESCHREIBUNG**

<b>Bauprozess</b>	Schicht-für-Schicht-Bauprozess durch lokales Aufschmelzen pulverförmigen Materials mittels Elektronenstrahl 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>	Bewegungsenergie der Elektronen
<b>Postprozess</b>	Stützkonstruktion entfernen; Verbesserung der Oberfläche durch Folgetechnologien

# KURZBESCHREIBUNG



Vgl. VDI 3405

## 2.1 Urformen

# EINFÜHRUNG IN DIE ELEKTRONENSTRAHLTECHNIK

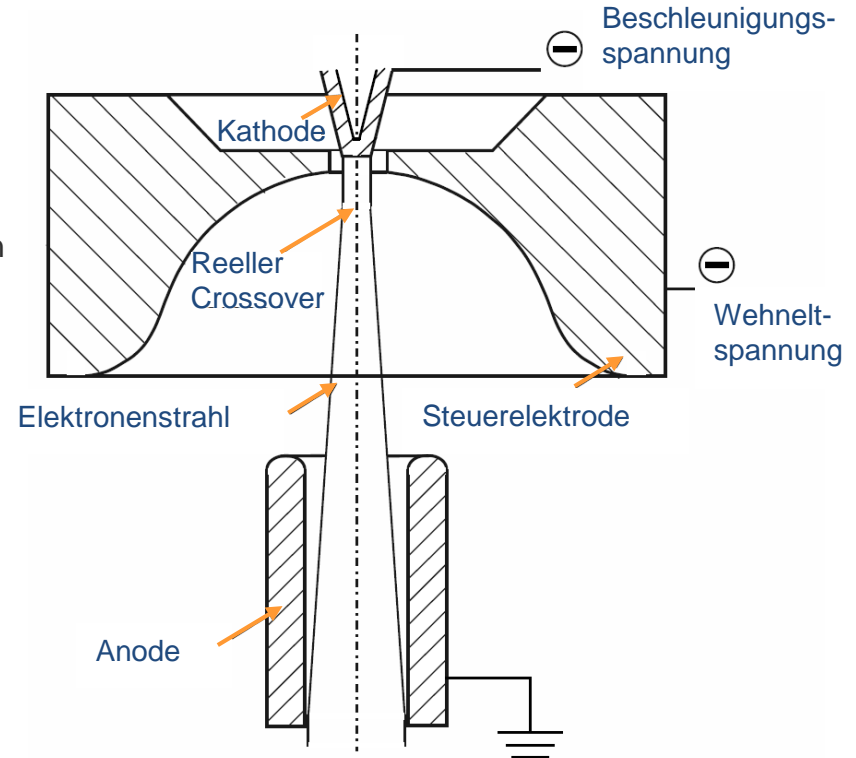
### Erzeugung eines Elektronenstrahls

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

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

Mit:

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

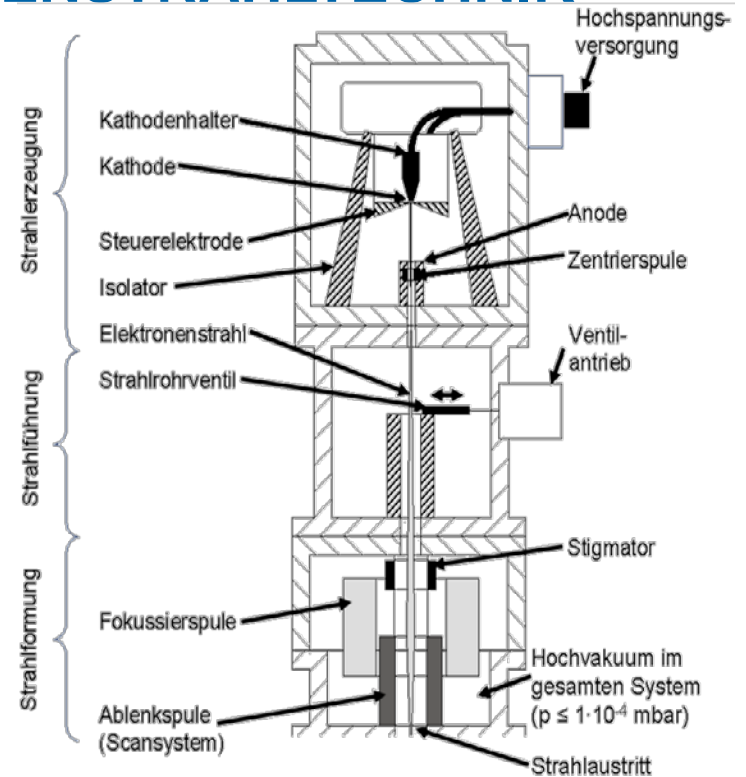


## 2.1 Urformen

# EINFÜHRUNG IN DIE ELEKTRONENSTRAHLTECHNIK

### Schematische Darstellung einer Elektronenstrahlkanone

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

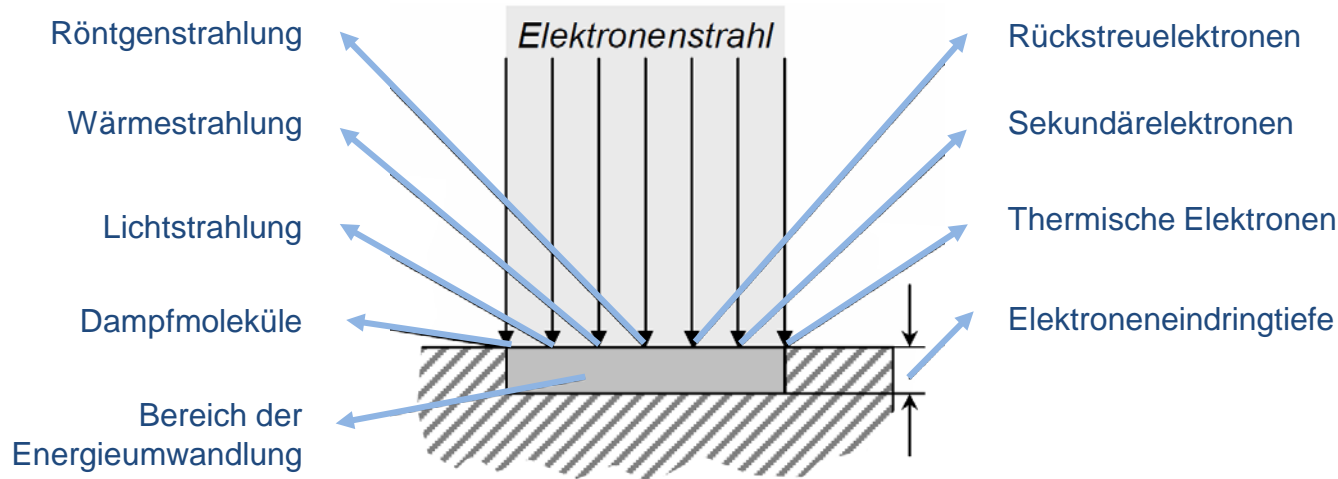


## 2.1 Urformen

# EINFÜHRUNG IN DIE ELEKTRONENSTRAHLTECHNIK

## Vorgänge bei der Energieeinkopplung eines Elektronenstrahls in Metalle

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



## 2.1 Urformen

# WERKSTOFFE

## Anforderung an den Werkstoff

### Schichtweiser Pulverauftrag

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

### Weitere Eigenschaften

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

### Baukammer

- Sphärische Partikel
- Sehr niedrige Verunreinigungsgehalte
- Partikelfraktion: 45 – 105  $\mu\text{m}$  (LBM: 10 – 45  $\mu\text{m}$ )

## 2.1 Urformen

# WERKSTOFFE

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

### Pulver im Forschungsstadium

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



## 2.1 Urformen

# AUFBAU EINER ELEKTRONEN-STRAHLSCHMELZ-ANLAGE

### Elektronenstrahlkanone

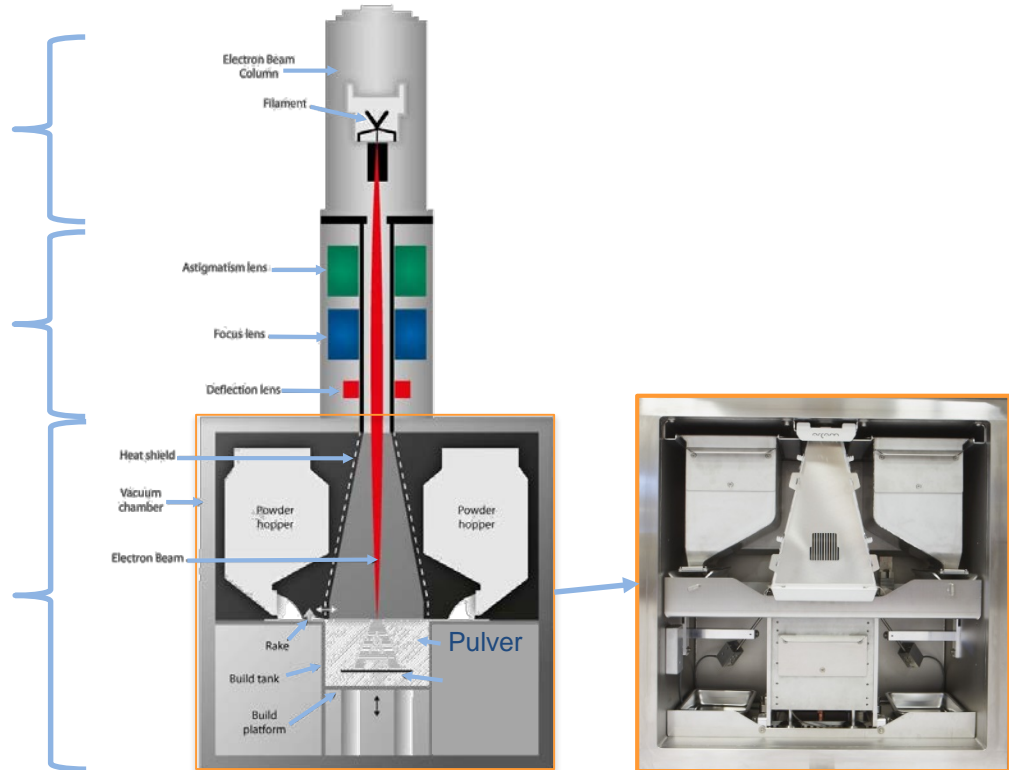
- Erzeugung des Elektronenstrahls

### Elektronenstrahlsäule

- Korrektur Strahlform
- Einstellung Strahlfokus
- Ablenkeinheit

### Baukammer

- Pulverzuführung
- Pulverauftrag
- Absenkung Bauplattform



## 2.1 Urformen

# ALLGEMEINE EIGENSCHAFTEN

### „Heißer“ Prozess

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

### Atmosphäre

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

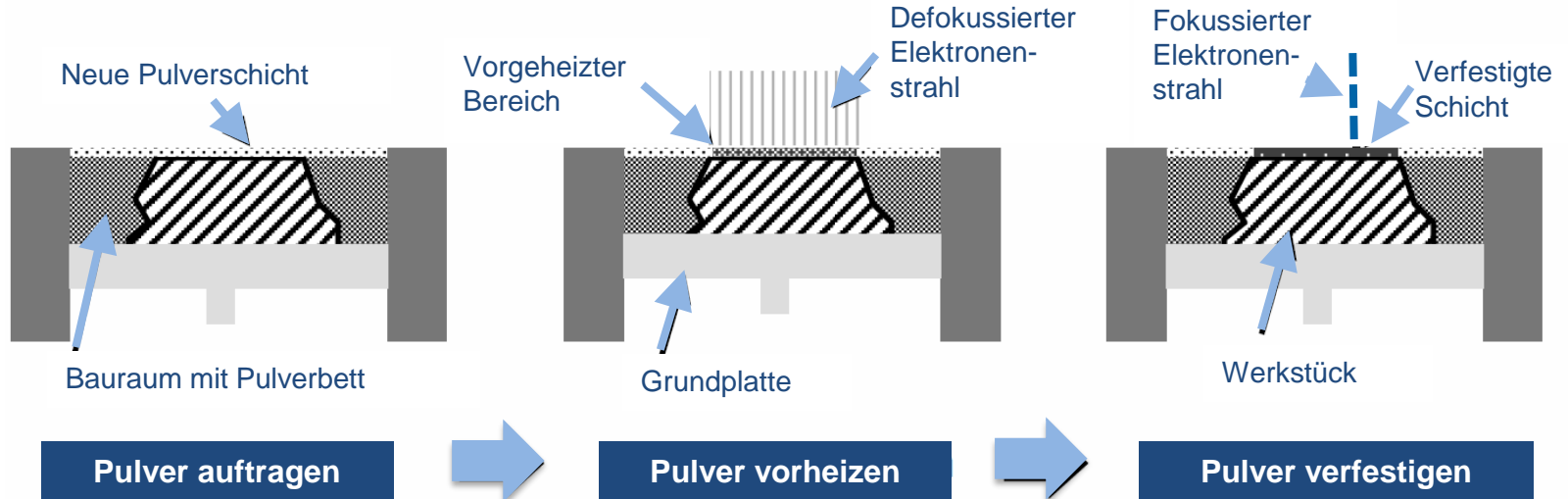
### Baukammer

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

## 2.1 Urformen

# BAUPROZESS

### Allgemeiner Verfahrensablauf

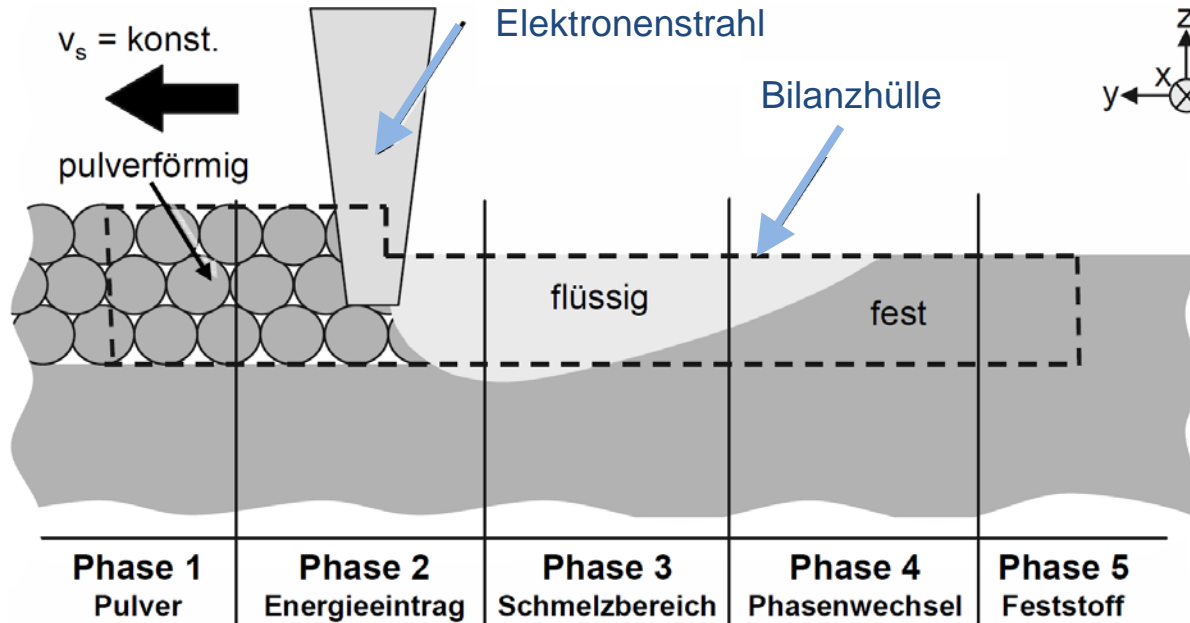


## 2.1 Urformen

# BAUPROZESS

Schema der Prozesszone mit Bilanzhülle

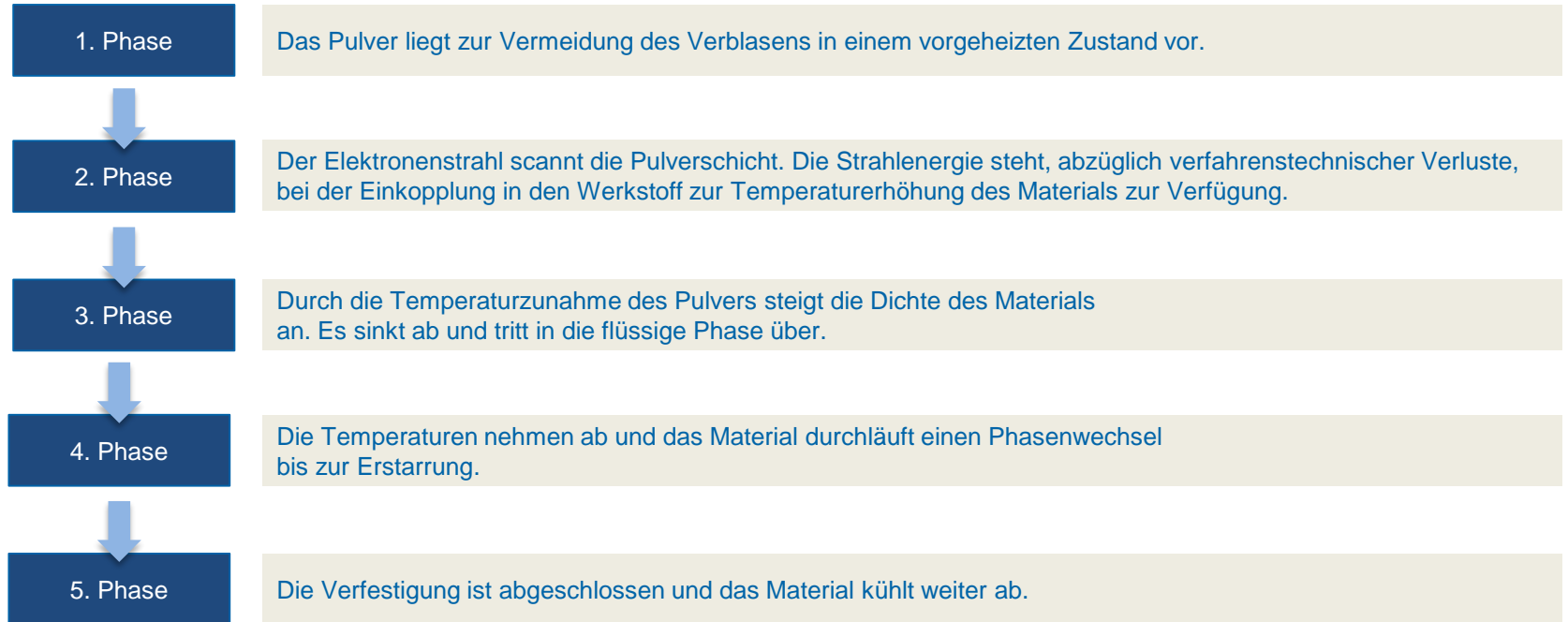
- Strahlauftreffbereich verbleibt nur ausgesprochen kurz an einer Stelle



## 2.1 Urformen

# BAUPROZESS

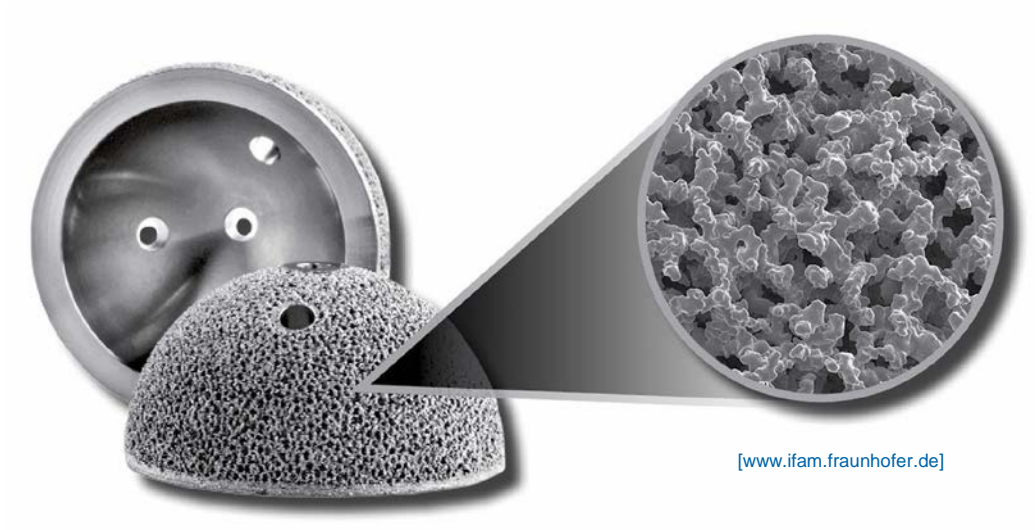
### Fünf Phasen bis zur Verfestigung des Pulvers



2.1 Urformen

# BEISPIELE

Hüftgelenkpfanne mit integrierten Trabecular Structures™



Komponente einer EBM-Anlage



Getriebegehäuse



## 2.1 Urformen

# VOR- UND NACHTEILE

### Vorteile

- + Verfügbarkeit einer hohen Energiedichte zum Aufschmelzen des Metallpulvers (ca. 1600°C)
- + Umgebungsbedingungen (Vakuum) führen zu hervorragenden Materialeigenschaften (homogene Materialstruktur)
- + Thermische Bedingungen bewirken hohe Formstabilität sowie eine kontrollierte thermische Balance im Bauteil
- + Vollständige Verschmelzung des Materials bis zu 100 %
- + Keine beweglichen Teile für die Steuerung des Strahls

### Nachteile

- Oberflächenqualität vergleichbar mit Sandguss
- Nachbearbeitungsverfahren zwingend erforderlich
- Bisher relativ kleine Materialpalette kommerziell verfügbar

# ANLAGEN

<b>Anlagentyp:</b>	A2X
<b>Hersteller:</b>	Arcam
<b>Baurate:</b>	55 / 80 cm <sup>3</sup> /h
<b>Strahlleistung:</b>	50 - 3000 W
<b>Bauraum:</b>	250 mm x 250 mm x 250 mm
<b>Scangeschwindigkeit:</b>	8000 m/s
<b>Anlagenabmaße:</b>	1850 mm x 900 mm x 2200 mm



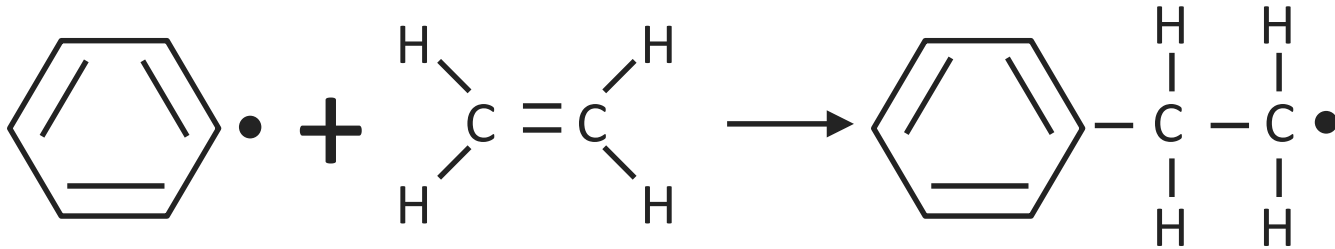


## 2.1 Urformen – Photopolymerisation

# EINFÜHRUNG

Polymerisation = flüssiges Monomer (Kohlen-Wasserstoff-Verbindung) wird zu festem Polymer

- Ungesättigte Moleküle / Dreiringmoleküle reagieren zu vernetzten Makro-Molekülen



Der Prozess muss so verändert werden, dass die notwendige kritische Energiedichte nur örtlich durch einen Laser eingebracht werden kann, da auch im Sonnenlicht ultraviolette Anteile sind.

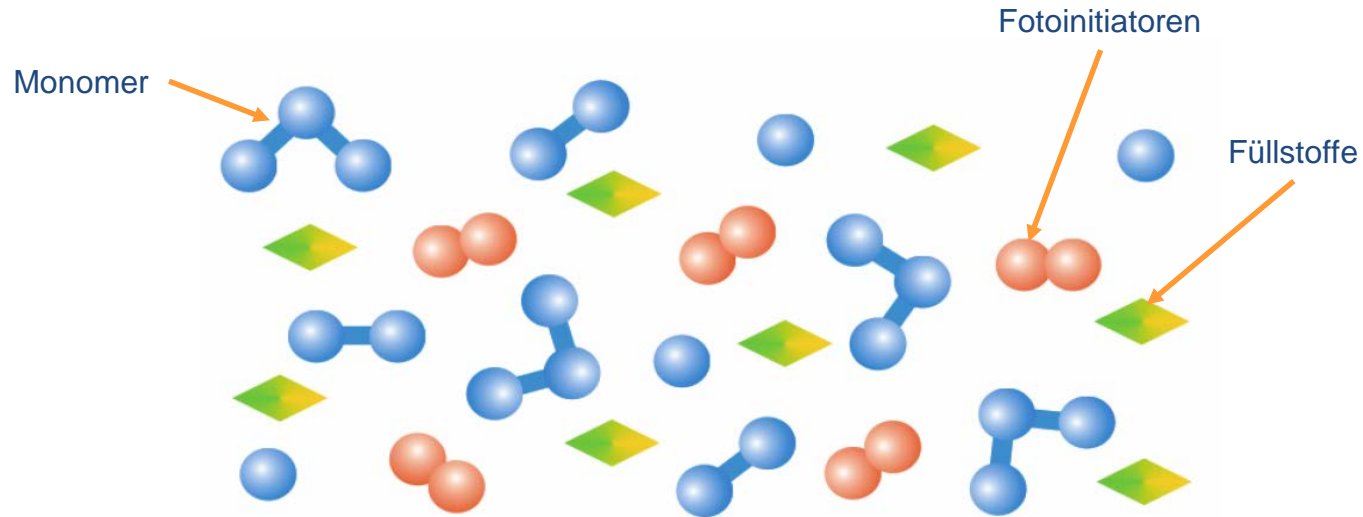
- Hinzufügen eines Initiators in das Monomer begrenzt die Polymerisation auf den Bereich des Laserstrahls
- Der Initiator zerfällt durch Beschuss mit einer bestimmten Wellenlänge in Radikale oder Ionen, welche die Polymerisation starten

## 2.1 Urformen – Photopolymerisation

# EINFÜHRUNG

Frisch erzeugte Schicht

Flüssiges Harz setzt sich vorwiegend aus Monomeren und Fotoinitiatoren zusammen

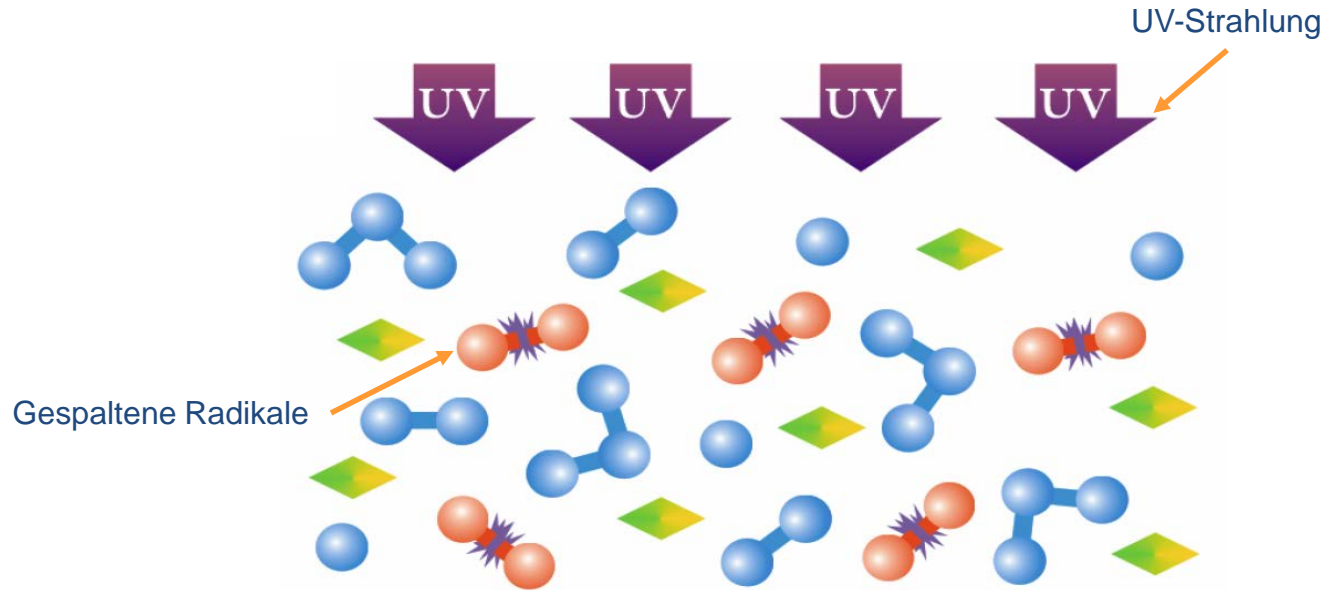


## 2.1 Urformen – Photopolymerisation

# EINFÜHRUNG

### UV-Belichtung

Bestrahlungsphase, in der die UV-Belichtung die Fotoinitiatoren in freie Radikale spaltet

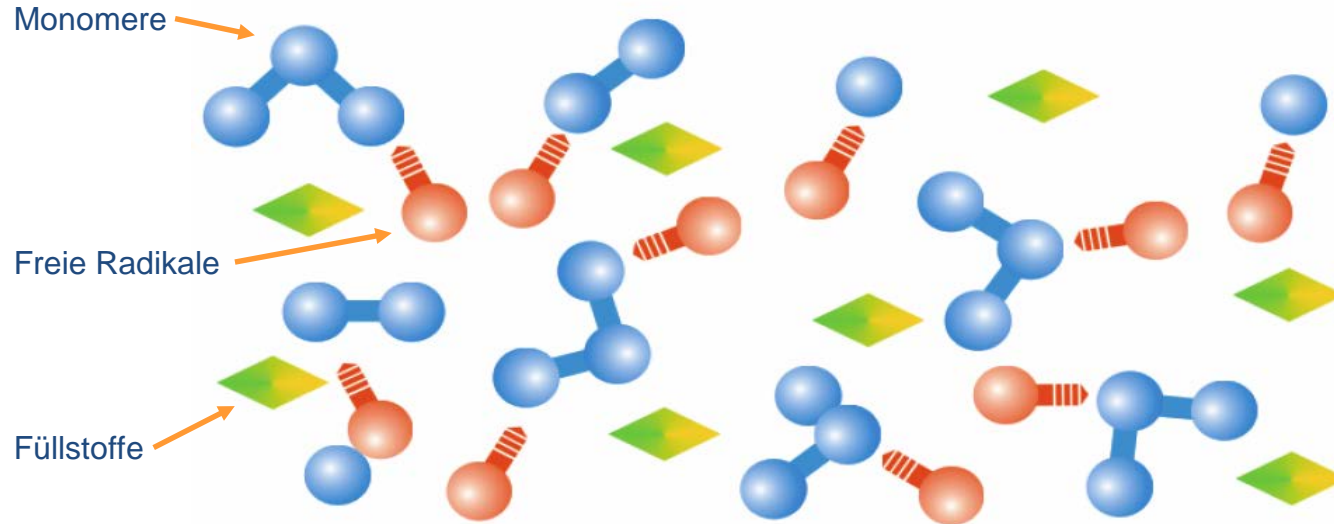


## 2.1 Urformen – Photopolymerisation

# EINFÜHRUNG

### Start der Polymerisation

Vernetzungsphase, in der sich Fotoinitiatoren und die Bindemittel zu Makromolekülen vernetzen

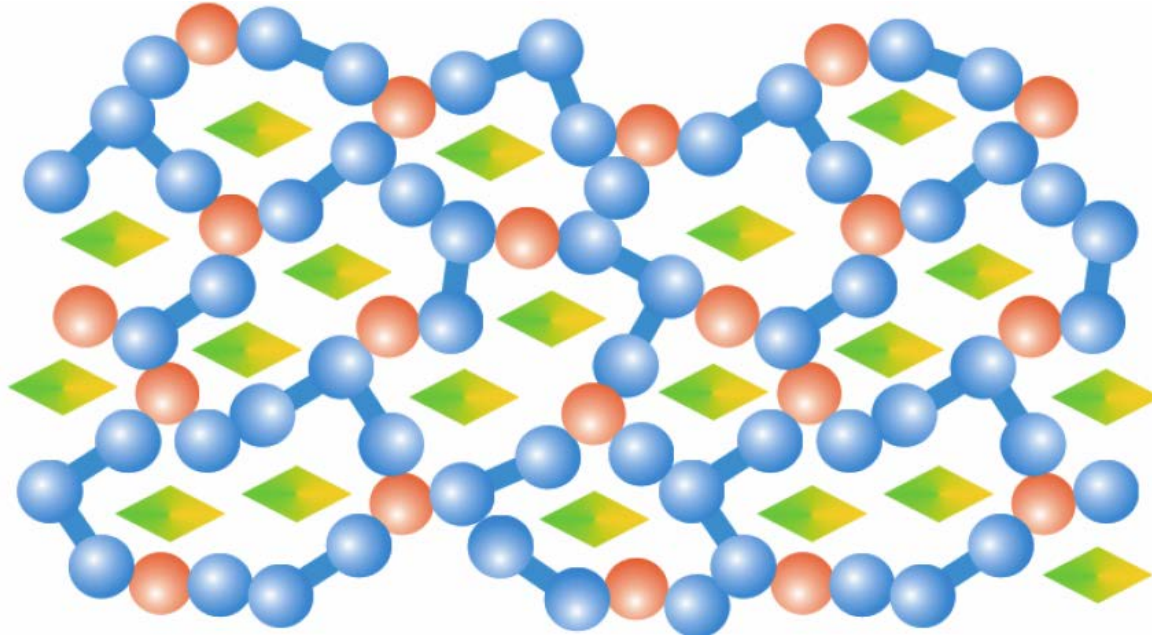


## 2.1 Urformen – Photopolymerisation

# EINFÜHRUNG

Vernetzte Polymerketten

Aushärtungsphase, in der sämtliche Verbindungen geschlossen werden





## STEREOLITHOGRAFIE - VIDEO



## 2.1 Urformen – Photopolymerisation

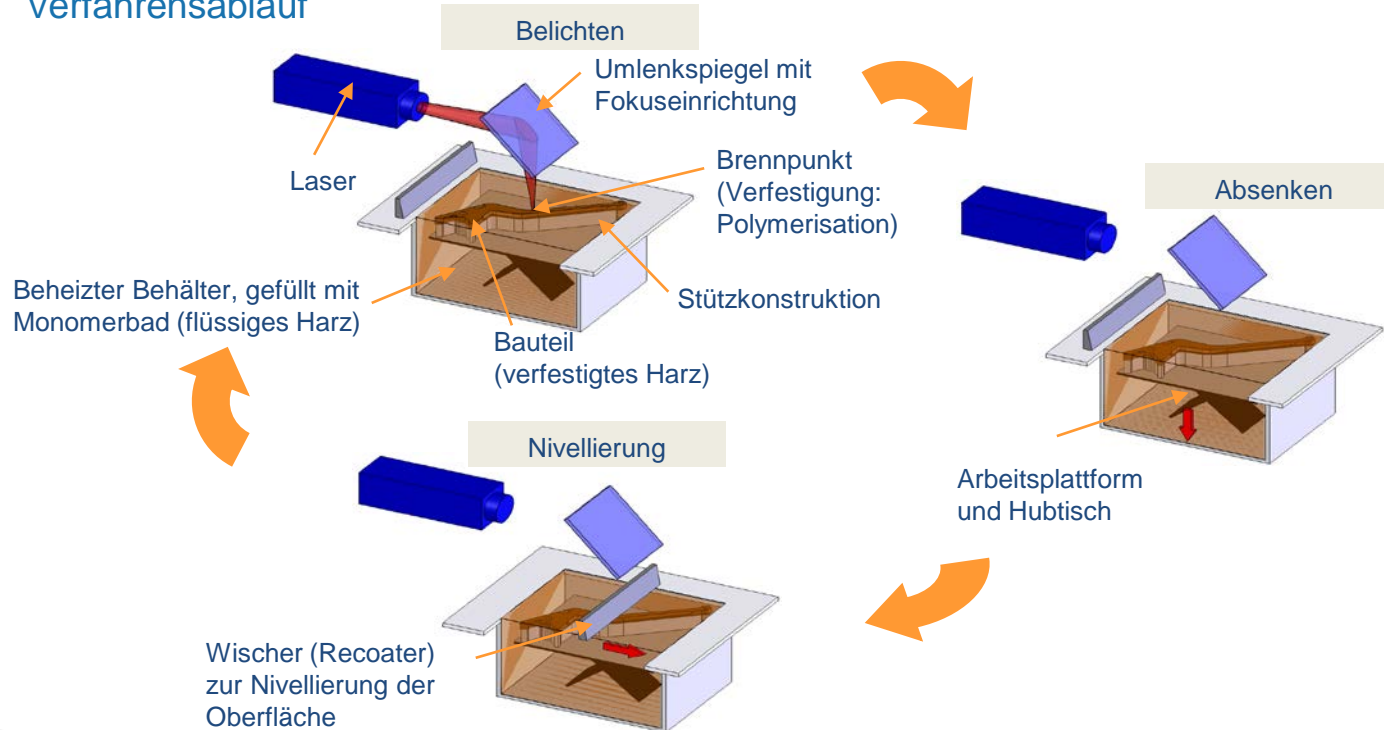
# SLA: KURZBESCHREIBUNG

<b>Bauprozess</b>	Schicht-für-Schicht-Bauprozess durch lokales Verfestigen von Monomer-Kunsthharzen (mit Fotoaktivatoren) unter Einwirkung von Laserlicht
<b>Ausgangsmaterial</b>	Flüssig bis pastös: UV-aktivierbare Kunsthharze ohne und mit Füllstoff
<b>Bindungsmechanismus</b>	Chemisch (Vernetzung)
<b>Vorgehen bei Materialverarbeitung</b>	Vektororientiert
<b>Aktivierungsenergie</b>	UV-Strahlung (Laser)
<b>Postprozess</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reinigen &amp; Support entfernen</li> <li>▪ Nachvernetzen / -härten im UV-Ofen</li> </ul>

## 2.1 Urformen – Photopolymerisation

# SLA: KURZBESCHREIBUNG

### Verfahrensablauf



## 2.1 Urformen – Photopolymerisation

# BAUMATERIALIEN

Flüssige Monomere (Harze) mit und ohne Füllstoff, die durch Photopolymerisation verfestigt werden können

- Hierzu zählen unter anderem:

Acrylharze

Epoxidharze

Vinylesterharze

- Werden dem Harz **Additive** hinzu gemischt, können durch Folgeprozesse **auch keramische** Bauteile hergestellt werden
- Je nach Anlagenhersteller oder Materiallieferant werden die gängigen Werkstoffe für Stereolithographieverfahren unter verschiedenen Handelsnamen geführt:
  - Accura® Produktreihe von 3D Systems
  - Poly150, TuskXC2700T, Flex70B... von Materialise
  - SOMOS® von DSM
  - RenShape® von Huntsmen Advanced Materials

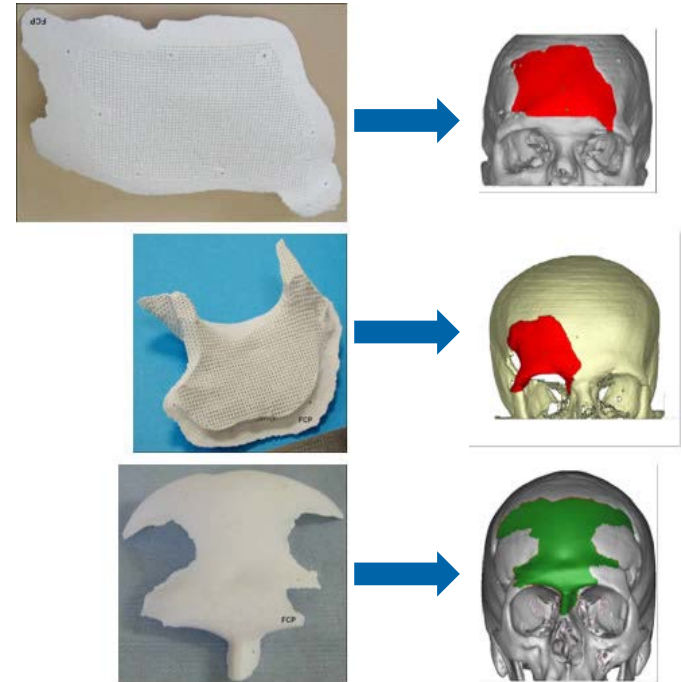
## 2.1 Urformen – Photopolymerisation

# BAUMATERIALIEN

Kunststoffharze mit keramischen Additiven


- Zur Erweiterung der Produktpalette wurden Verfahren zur Herstellung keramischer SL- Bauteile entwickelt
- Dem Harz wird 45 bis 70 vol. % pulverförmiges keramisches Material untergemischt, so dass eine pastöse Masse entsteht
- Gängige keramische Additive sind:
  - Oxide (z.B.  $Al_2O_3$ ,  $ZrO/Y_2O_3$ , ...)
  - Carbide (SiC)
  - Nitride ( z.B.  $Si_3N_4$ , AlN)
  - Minerale (Apatit-(CaOH) auch Hydroxylapatit , MULLITE ( $Al_6Si_2O_{13}$ ))

### Keramische Schädelimplantate aus Hydroxylapatit



## 2.1 Urformen – Photopolymerisation

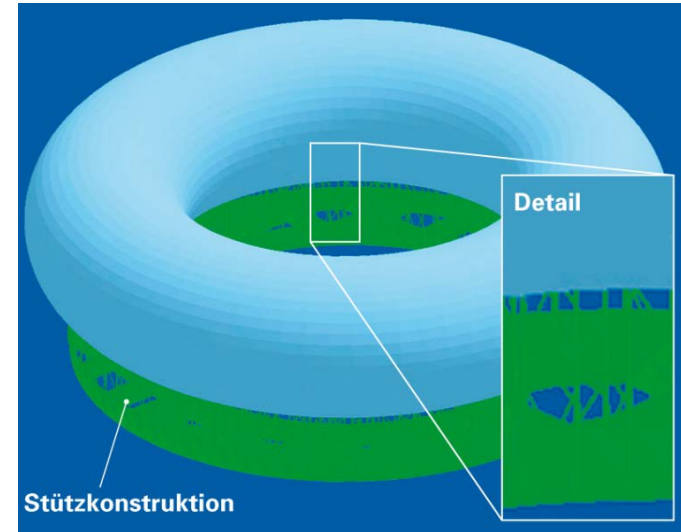
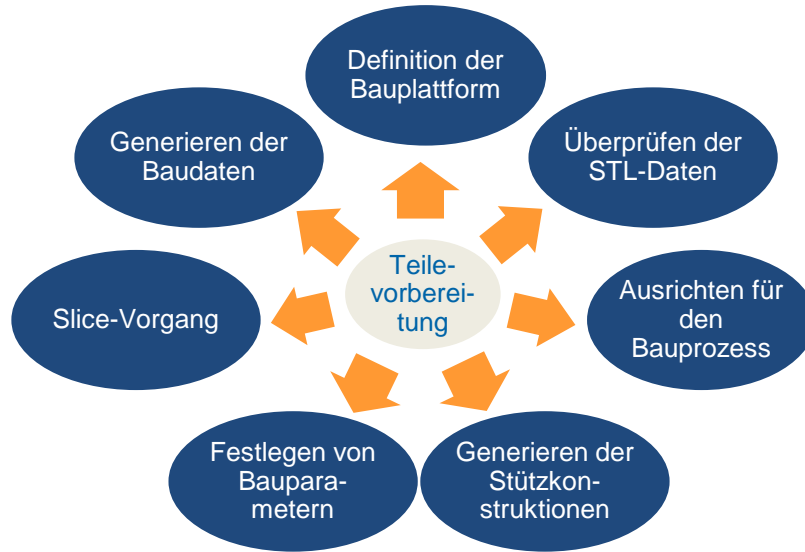
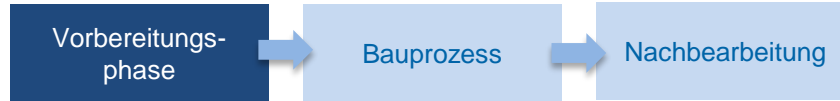
# KOMMERZIELL VERFÜGBARE MATERIALIEN



	Material Properties/Charateristics						Key Application Areas					
	Accuracy	HiTemp	Moisture Resistance	Optical Clarity	Durability	Color	Investment Casting/ QuickCast	RTV/Master Patterns	Snap Fit Assemblies	General Purpose Models	Automotive- Under the hood	WindTunnel Testing
<b>Polypropylene-Like Class</b>												
Accura 25	●●●●		●●●		●●●●	White		●●●●	●●●●	●●●●		
Accura PP White (SL 7811)	●●●		●●●●		●●●●	White		●●●	●●●●	●●●		
<b>Tough/Durable Class</b>												
Accura Xtreme	●●●●		●●●		●●●●	Grey		●●●●	●●●●	●●●●		
Accura Xtreme White 200	●●●●				●●●●●	White		●●●	●●●●●	●●●		
<b>ABS-Like Class</b>												
Accura 55	●●●●		●●●		●●●	White		●●●	●●●	●●●●		
Accura ABS White (SL 7810)	●●●		●●●●		●●●●	White		●●●	●●●	●●●		
Accura ABS Black (SL 7820)	●●●		●●●●		●●●●	Black		●●●	●●●	●●●		
<b>Clear Class</b>												
Accura ClearVue Free (SL 7870)	●●●		●●●●	●●●●	●●●●	Clear	●●●	●●●	●●●	●●●		
Accura ClearVue	●●●		●●●●●	●●●●●	●●●●	Clear		●●●	●●●	●●●		
Accura 60	●●●●		●●●	●●●	●●●	Clear/Blue	●●●●	●●●●	●●●	●●●●●		
<b>Casting Class</b>												
Accura CastPro	●●●●		●●●●●			Clear Amber	●●●●●					
Accura CastPro Free (SL 7800)			●●●			Clear Amber	●●●●●					
<b>High Temp &amp; Composite Class</b>												
Accura 48 HTR		●●●●	●●●			Clear Amber					●●●●	
Accura SL 5530		●●●●	●●●			Clear Amber					●●●	
Accura PEAK	●●●●	●●●●	●●●●			Translucent Amber					●●●●●	●●●●●
Accura CeraMAX	●●●●●	●●●●●	●●●●●			White						●●●●●
Accura Bluestone	●●●●●	●●●●●	●●●●●			Blue						●●●●●

## 2.1 Urformen – Photopolymerisation

# VORBEREITUNGSPHASE

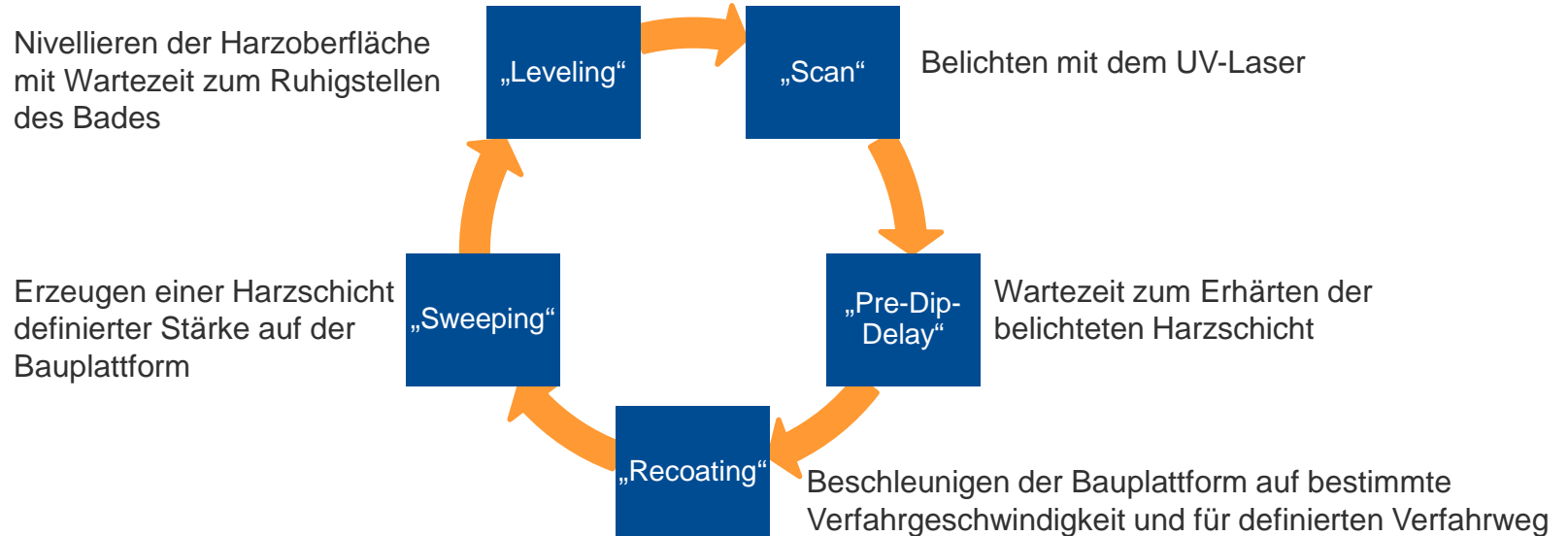


## 2.1 Urformen – Photopolymerisation

# BAUPROZESS



### Abfolge in der Maschine



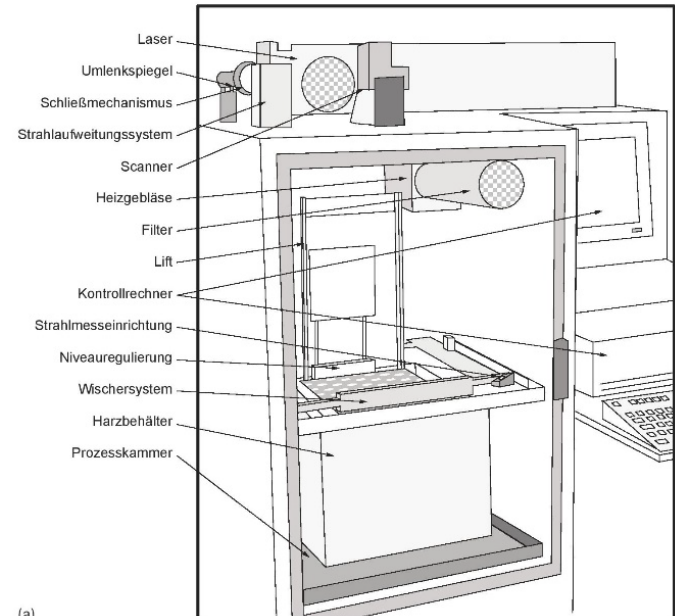
## 2.1 Urformen – Photopolymerisation

# BAUPROZESS



### Aufbau einer Stereolithographieanlage

- Ultraviolett (UV) -Laser
- Optisches Umlenksystem
- Bad aus photosensitivem Harz
- Höhenverstellbare Plattform
- Software, die die Position der Plattform und des Lasers kontrolliert sowie die Belichtung der Harzoberfläche steuert



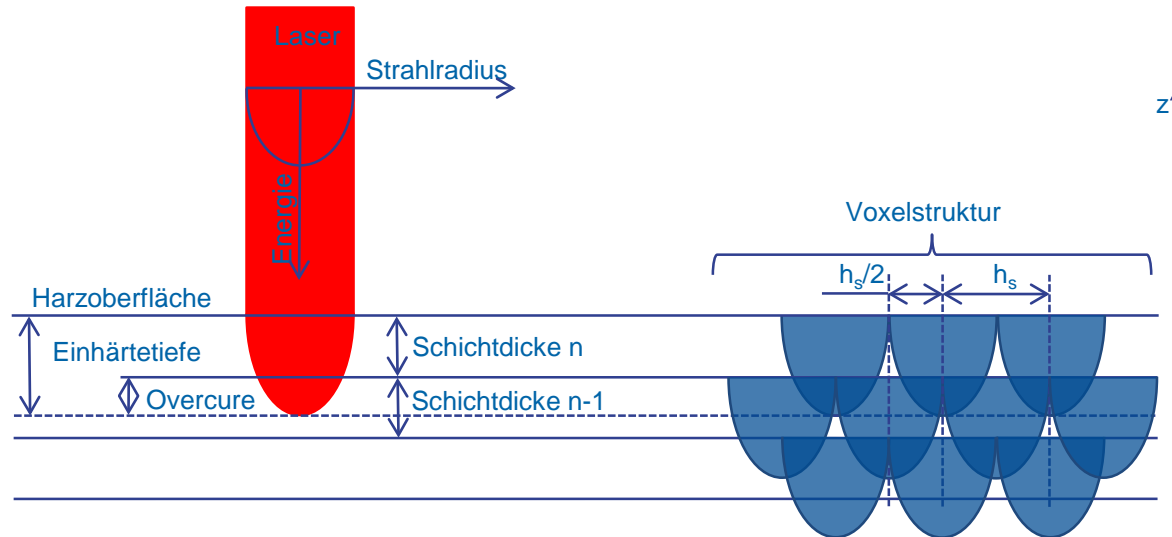
(a)

## 2.1 Urformen – Photopolymerisation

# BAUPROZESS



### Einwirkung des Laserstrahls auf die Harzoberfläche



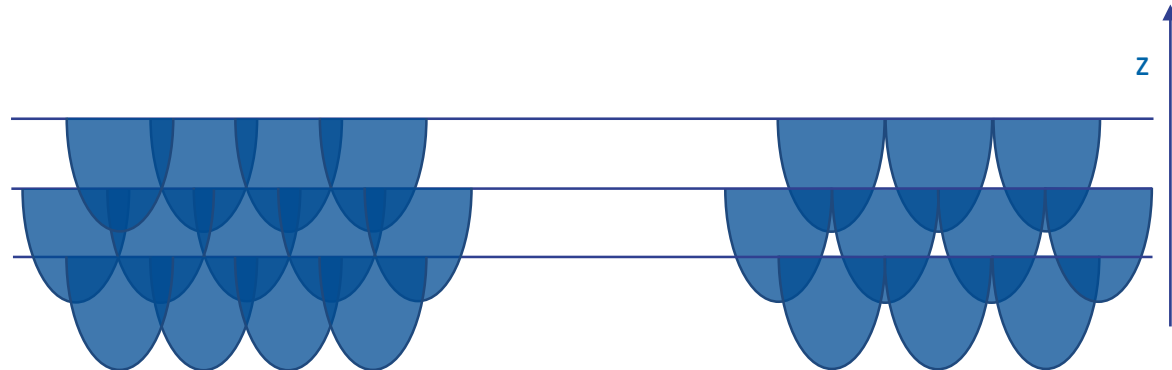
## 2.1 Urformen – Photopolymerisation

# BAUPROZESS



### Einwirkung des Laserstrahls auf die Harzoberfläche

- Jede Linie wird einzeln abgefahren und ausgehärtet
- Schraffurabstand und Eindringtiefe müssen dabei groß genug sein, um die gerade abgefahrene Scanlinie mit den angrenzenden Linien zu verbinden



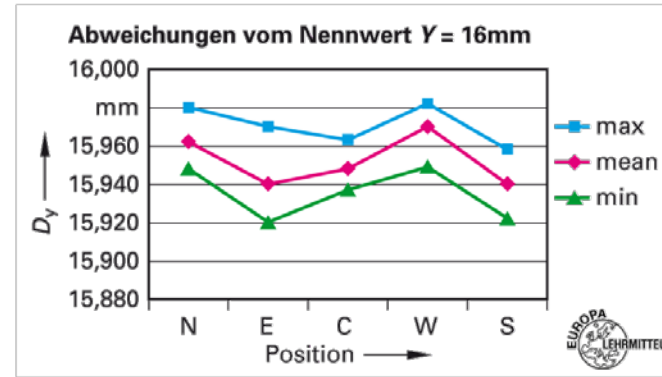
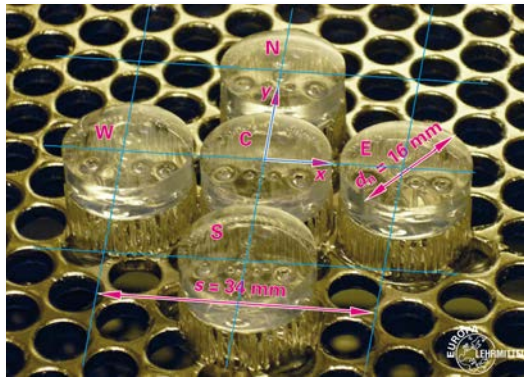
## 2.1 Urformen – Photopolymerisation

# BAUPROZESS



### Genauigkeit

- Stereolithografie gehört zu den genauesten additiven Fertigungsverfahren
- Da das Ausgangsmaterial in flüssiger oder pastöser Form vorliegt, können nahezu beliebig feine Schichtstärken verwendet werden



## 2.1 Urformen – Photopolymerisation

# BAUPROZESS

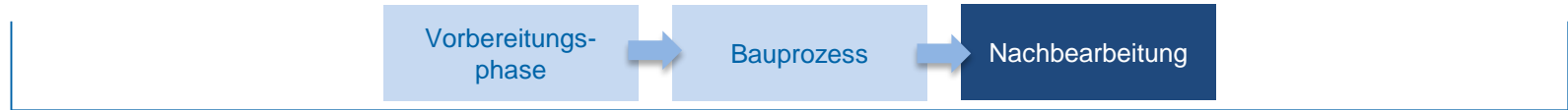


### Oberflächengüte

- Im Vergleich zu anderen additiven Fertigungsverfahren weisen SL-Verfahren sehr gute Oberflächenqualität auf
- Durch wiederholende Schichtstruktur tritt an den vertikalen Bauteilwänden eine Welligkeit auf
- Oberflächenqualität wird auch durch Prozessparameter und Werkstoffeigenschaften beeinflusst

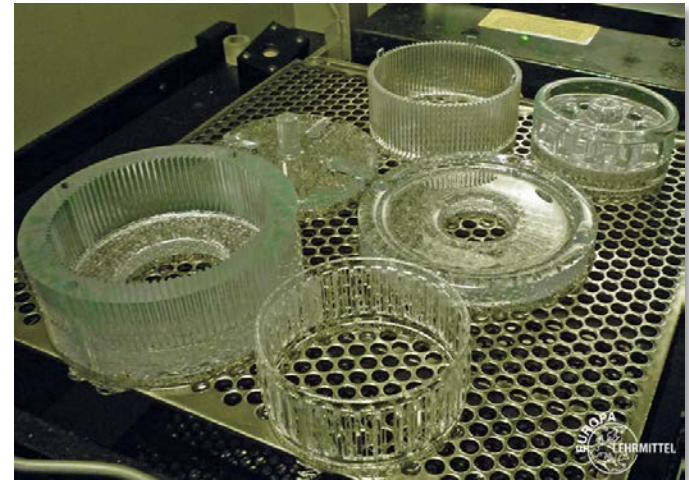
Messungsort	Schichtdicke [mm]	Mittenrauwert $R_A$ [ $\mu\text{m}$ ]	Welligkeit $W_T$ [ $\mu\text{m}$ ]
horizontale Fläche	0,125	6,4	93
	0,25	7,6	97
vertikale Fläche	0,125	3,1	11
	0,25	3,5	10

# NACHBEARBEITUNG



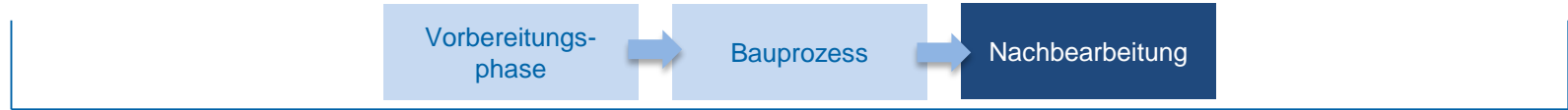
### Bauteile auf ausgefahrener Bauplattform

Nach Abschluss des Bauprozesses fährt die Bauplattform nach oben, so dass das verfestigte Bauteil entnommen werden kann.



## 2.1 Urformen – Photopolymerisation

# NACHBEARBEITUNG



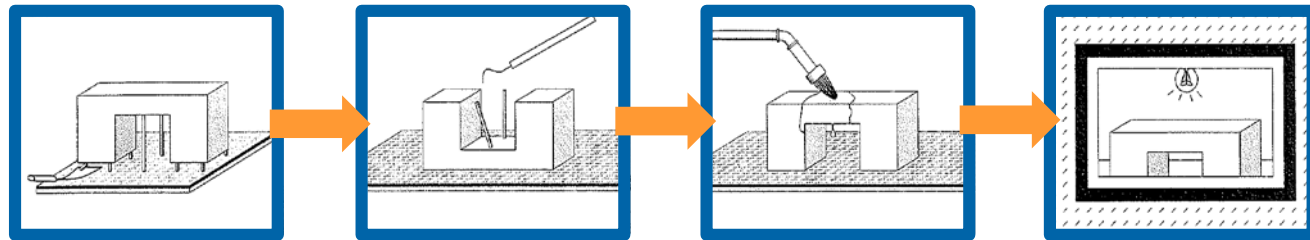
### Entfernung der Stützkonstruktionen

- Mechanisches Abbrechen i.d.R. manuell
- Reinigung mit Isopropanol oder Aceton

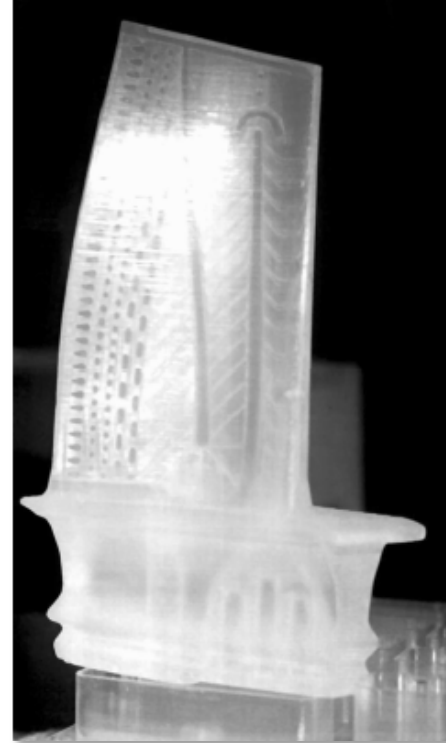
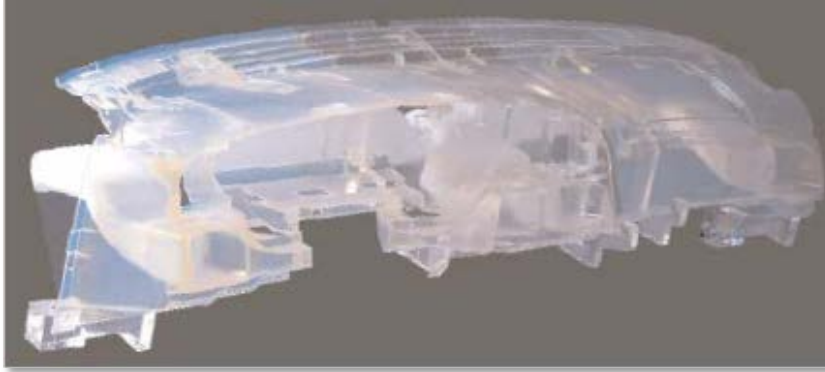


### Nachvernetzung

- Bestrahlung mit UV-Licht bis zur vollständigen Aushärtung
- Optional Oberflächenfinish zur Erhöhung der visuellen Eigenschaften



# PRODUKTBEISPIELE



## 2.1 Urformen – Photopolymerisation

# PRODUKTBEISPIELE

Beispiele für Medizinische Anschauungs- und Geometriemodelle

Rekonstruktion eines  
Neandertaler-Schädels



Zahn-/Dentalmodelle



## 2.1 Urformen – Photopolymerisation

# SLA: VOR- UND NACHTEILE

- |   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>⊕ Derzeit eines der genauesten Verfahren; Einschränkungen sind maschinenbedingt (nicht verfahrensbedingt, vgl. Gebhardt)</li> <li>⊕ Hohe Bauteilkomplexität darstellbar</li> <li>⊕ Bauteilinterne Hohlräume möglich</li> <li>⊕ Transparente Materialien möglich</li> <li>⊕ Komplexe Modelle können aus mehreren Teilen zusammengesetzt werden, ohne dass die Trennstellen sichtbar sind (erfordert entsprechenden Kleber)</li> <li>⊕ Lackierung möglich</li> <li>⊕ Mechanische Bearbeitung möglich</li> <li>⊕ Nicht benötigtes flüssiges Material kann wiederverwendet werden</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>⊖ Spezielles photosensitives Material erforderlich</li> <li>⊖ Geringe thermische und mechanische Belastung im Vergleich zu anderen Verfahren</li> <li>⊖ Stützkonstruktionen erforderlich</li> <li>⊖ Treppenstufeneffekt</li> <li>⊖ Finishing erforderlich (z. B. Polieren)</li> <li>⊖ Zweistufiges Verfahren: 95 % Verfestigung durch Laser, anschließend Nachvernetzung erforderlich (Wärmebehandlung)</li> <li>⊖ Absaugung erforderlich (beim Bauprozess entstehen gesundheitsschädliche Gase)</li> <li>⊖ Modelle neigen zum Kriechen</li> <li>⊖ Harze sind hygroskopisch</li> </ul> |
|---|---|

## 2.1 Urformen – Photopolymerisation

# ANLAGEN

**Anlagentyp:** ProX 800

**Hersteller:** 3D Systems

**Bauraum:** unterschiedliche Varianten  
min. 650 x 750 x 50 mm  
max. 650 x 750 x 550 mm

**Genauigkeit:** 0,025 - 0,05 mm je 25,4 mm des Teilabmaß

**Abmaße:** 137 x 160 x 226 cm



## 2.1 Urformen – Photopolymerisation

# ANLAGEN

**Anlagentyp:** ProX 950

**Hersteller:** 3D Systems

**Bauraum:** 1500 x 750 x 550 mm

**Genauigkeit:** 0,025 - 0,05 mm je 25,4 mm des  
Teilabmaß

**Abmaße:** 220 x 160 x 226 cm



[3D Systems]

www.uni-due.de/fertigungstechnik | [3D Systems]



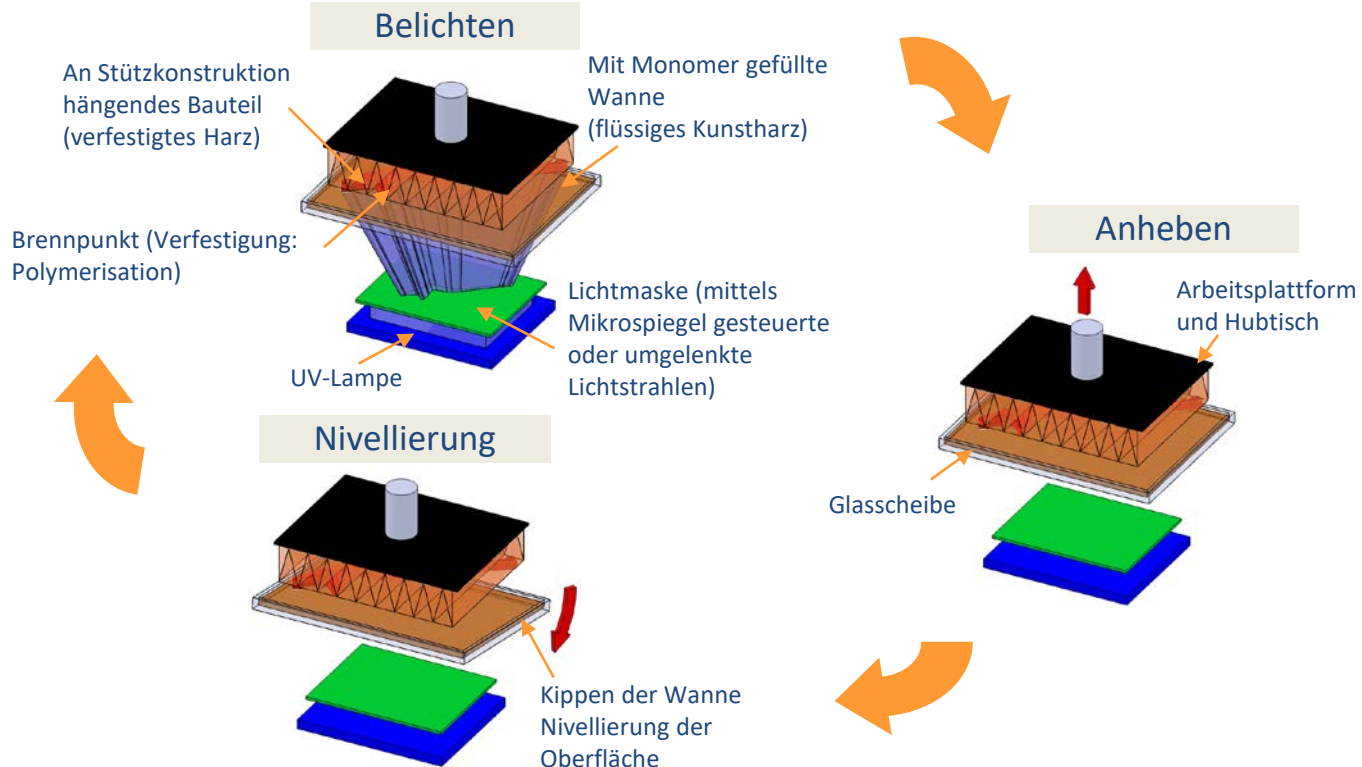
## 2.1 Urformen – Photopolymerisation

# DLP: KURZBESCHREIBUNG

<b>Bauprozess</b>	Schicht-für-Schicht-Bauprozess durch lokales Verfestigen von Monomer-Kunsthharzen (mit Fotoaktivatoren) unter Einwirkung von UV-Licht
<b>Ausgangsmaterial</b>	Flüssig bis pastös: UV-aktivierbare Kunsthharze ohne und mit Füllstoff
<b>Bindungsmechanismus</b>	Chemisch (Vernetzung)
<b>Vorgehen bei Materialverarbeitung</b>	Rasterorientiert
<b>Aktivierungsenergie</b>	UV-Strahlung (Lampe, Projektor)
<b>Postprozess</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reinigen &amp; Support entfernen</li> <li>▪ Nachvernetzen / -härten im UV-Ofen</li> </ul>

## 2.1 Urformen – Photopolymerisation

# DLP: KURZBESCHREIBUNG



## 2.1 Urformen – Photopolymerisation

# DLP: BAUPROZESS / MASCHINEN (VIDEO)

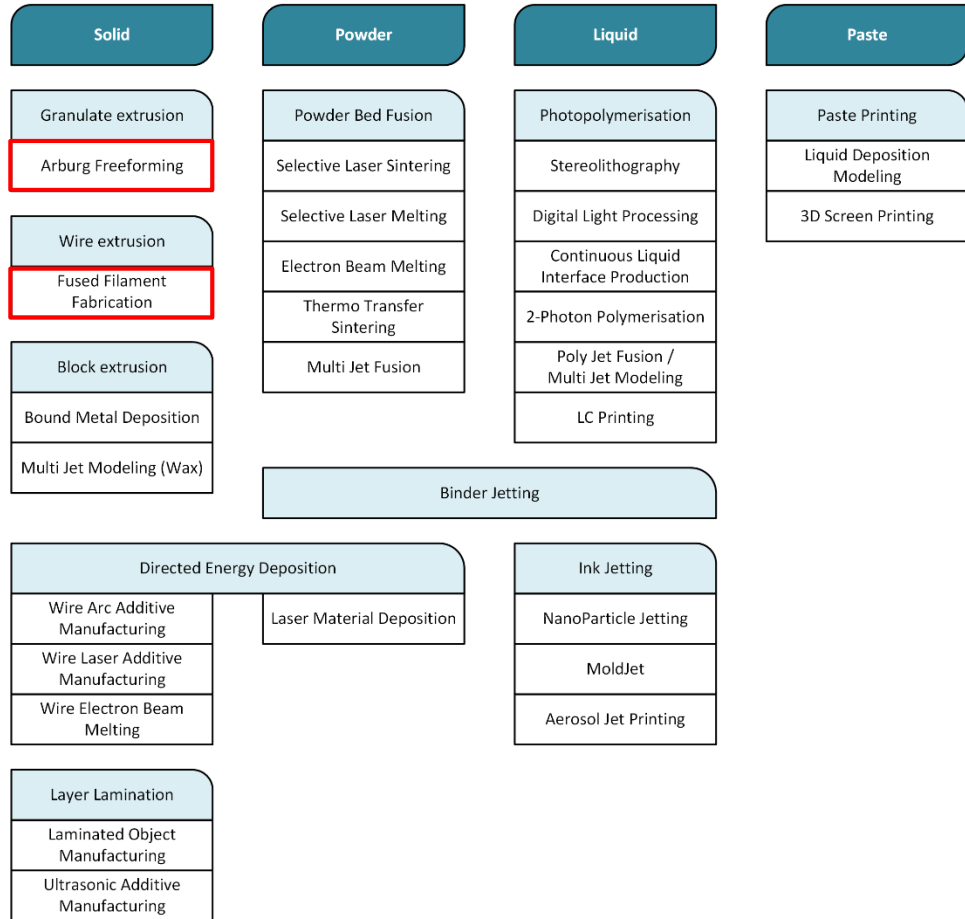


<https://youtu.be/45JJK-VzLc>

## 2.1 Urformen

# MATERIAL EXTRUSION

Definition nach  
DIN EN ISO/ASTM 52900:  
“additive manufacturing process in  
which material is selectively dispensed  
through a nozzle or orifice“





## 6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

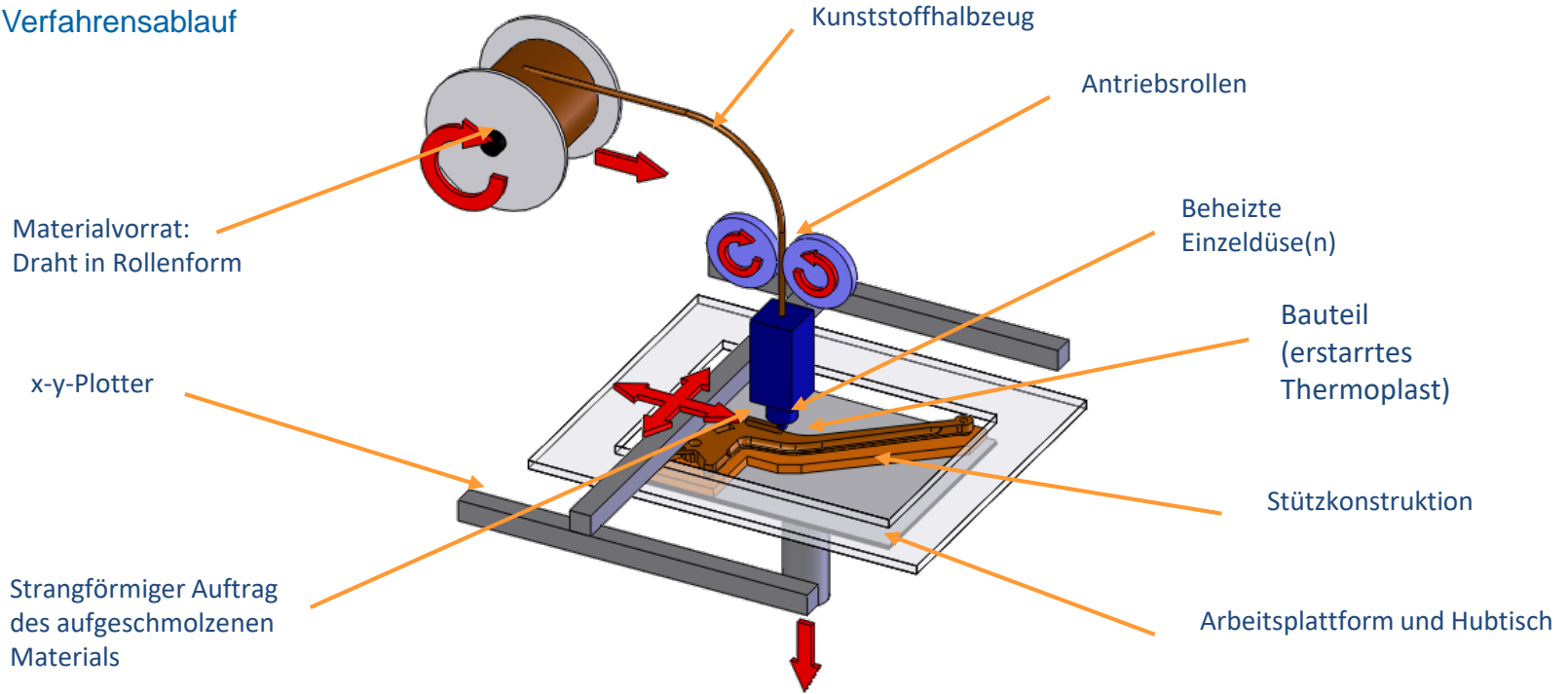
# FFF/FDM: KURZBESCHREIBUNG

<b>Bauprozess</b>	Schicht-für-Schicht-Bauprozess durch Erweichen und lokales Auftragen thermoplastischen Materials mittels einer beheizten Düse oder eines Druckkopfs; unmittelbare Verfestigung des extrudierten Materials
<b>Ausgangsmaterial</b>	strang- oder filamentförmig: ein oder zwei unterschiedliche <b>Polymere</b> (Bauteilmaterial, Stützkonstruktion) ohne oder mit Füllstoff
<b>Bindungsmechanismus</b>	Physikalisch (thermisch)
<b>Vorgehen bei Materialverarbeitung</b>	Vektororientiert
<b>Aktivierungsenergie</b>	Wärmeleitung im Düsen-/Druckkopf zum Erwärmen/Erweichen/Aufschmelzen des Ausgangsmaterials
<b>Postprozess</b>	Stützkonstruktion z. B. mechanisch oder mittels Laugen entfernen; Reinigen; Beschichten

2.1 Urformen – Material extrusion

# FFF/FDM: KURZBESCHREIBUNG

Verfahrensablauf



## FDM VIDEO

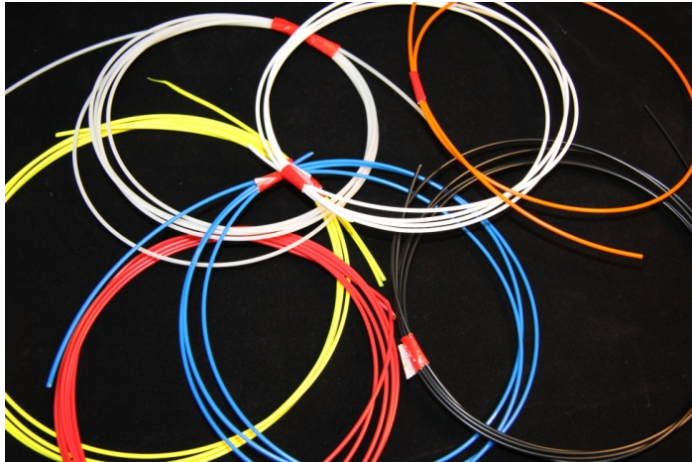


## 2.1 Urformen – Material extrusion

# MATERIAL

### Ausgangszustand

- Thermoplastischer Kunststoff
- Fest und drahtförmig auf Rollen aufgewickelt – „Filament“ (typ. Durchmesser 1,75 und 2,85mm)
- Mehrere Farbkombinationen im Prozess möglich (mehrere Düsen oder Filament-Wechsel-Systeme nötig)



## 2.1 Urformen – Material extrusion

# VERFÜGBARE MATERIALIEN

### ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol)

- Standardwerkstoff in vielen Spritzguss-Anwendungen -> gut übertragbar von AM/Prototyp auf Serie
- Weißes, relativ schlagzähes Kunststoffmaterial
- Festigkeitseigenschaften ähnlich wie Nylon

### ABSi (significantly increased strength and impact resistance than ABS)

- Erhöhte Schlagfestigkeit gegenüber ABS
- Transluzent und in mehreren Farben verfügbar

### PC (Polycarbonat)

- 10 % niedrigere Festigkeit als ABS
- Biegefestigkeit doppelt so hoch wie bei ABS
- Bis zu 125 °C temperaturbeständig

### PC-ISO

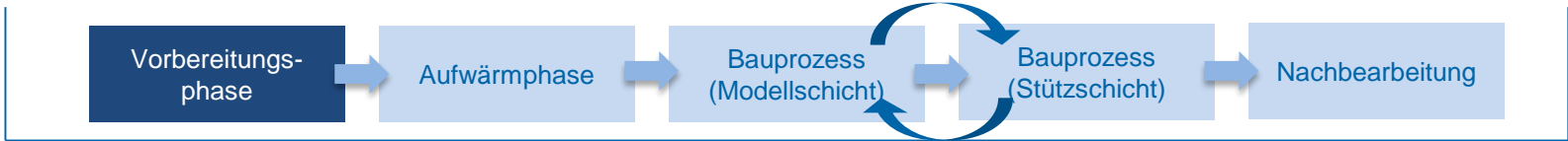
- Einsatz in der Medizintechnik
- Sterilisierbarer Werkstoff

### PPSF (Polyphenylsulfon)

- Erster Hochleistungskunststoff in einer additiven Anlage
- Gleiche mechanische Eigenschaften wie ABS, allerdings temperaturbeständig > 200 °C

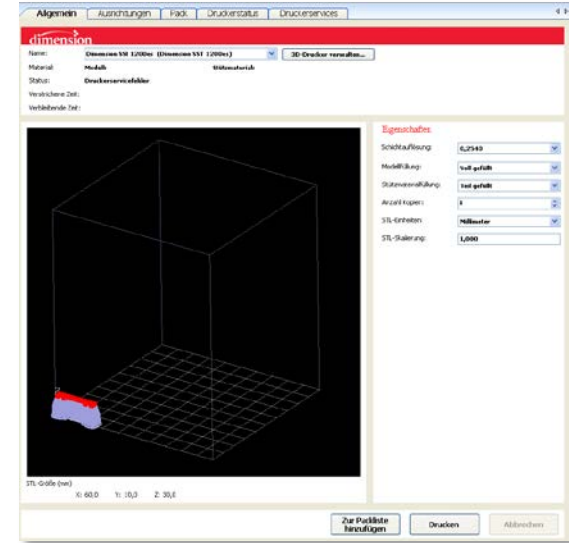
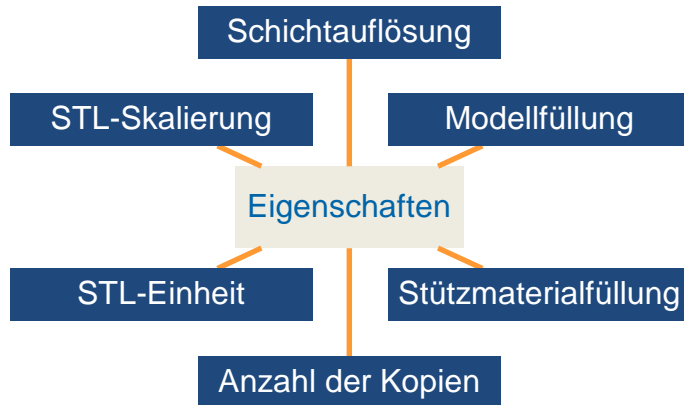
## 2.1 Urformen – Material extrusion

# VORBEREITUNGSPHASE



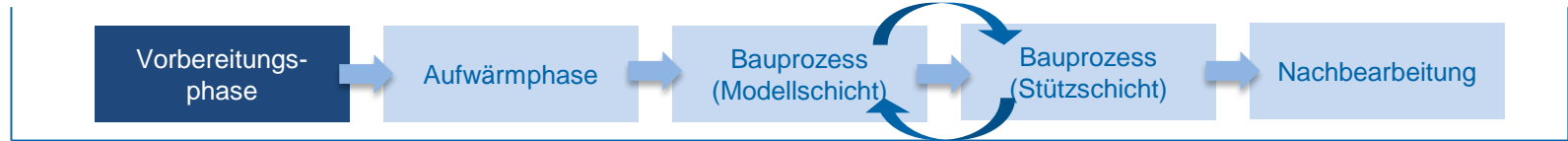
Bauprozesseinrichtung mit Hilfe der Anlagensoftware CatalystEX

- Laden der fehlerfreien STL-Datei in die Anlagensoftware
- Definition des Eigenschaftsprofils:



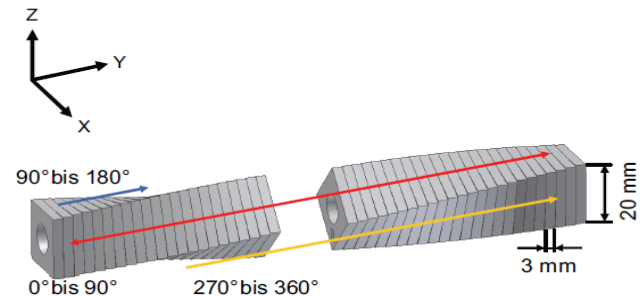
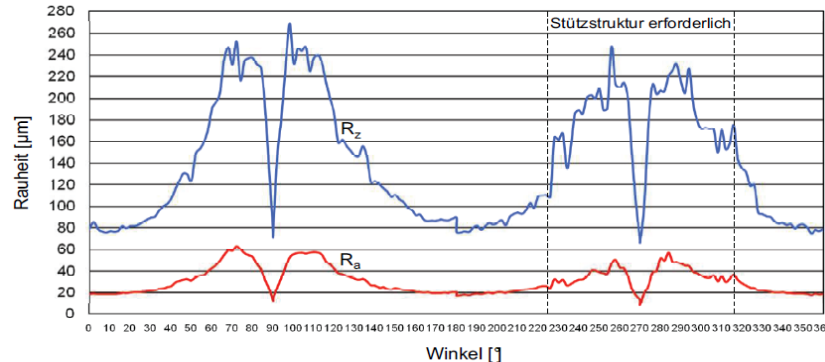
## 2.1 Urformen – Material extrusion

# VORBEREITUNGSPHASE



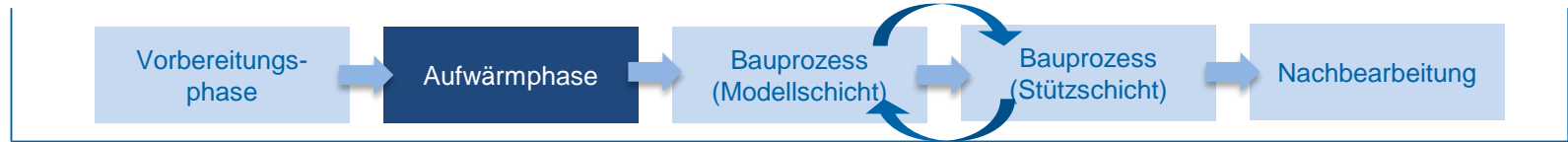
### Stützkonstruktionen

- Bei Modellabschnitten und Überhängen sind Stützen notwendig
- Automatische Berechnung und Erstellung der Stützen mittels der Anlagensoftware
- Stützflächen werden ab ca. 45° Neigung erzeugt

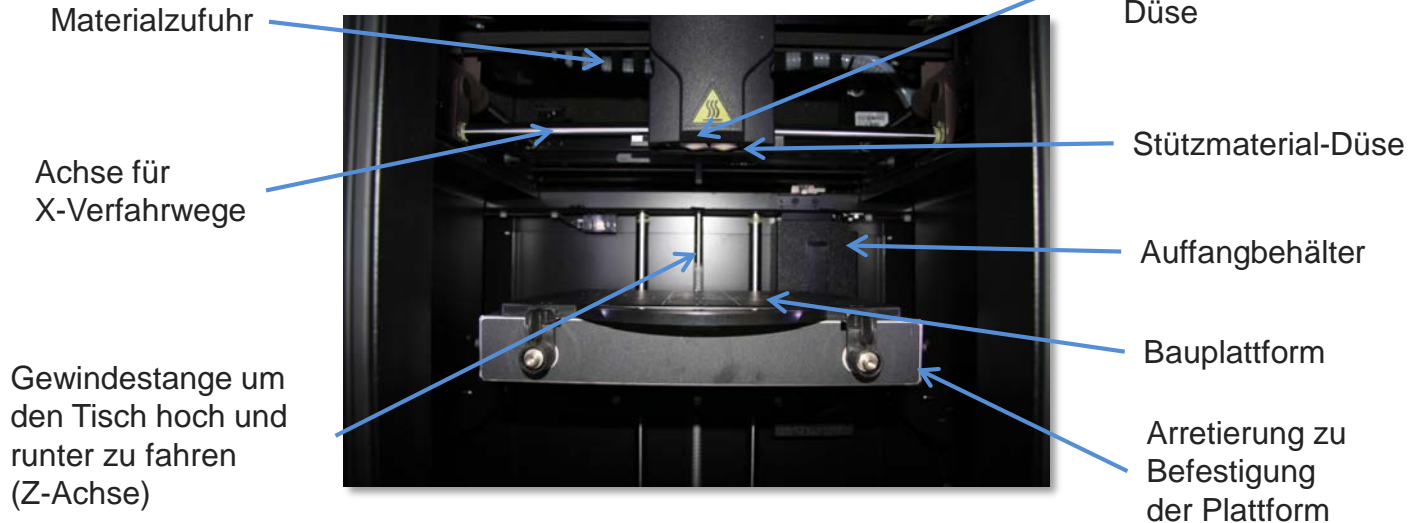


## 2.1 Urformen – Material extrusion

# AUFWÄRMPHASE

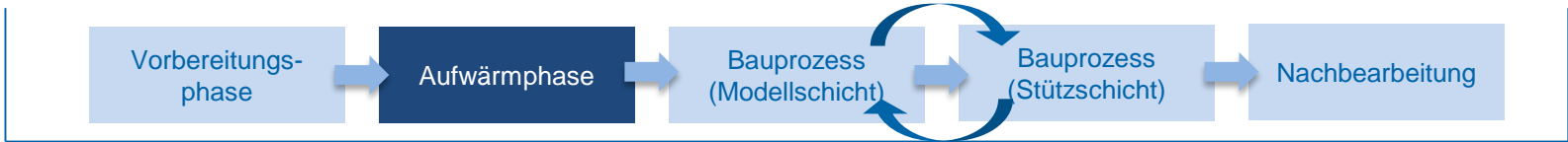


Einrichtung des Anlagensystems

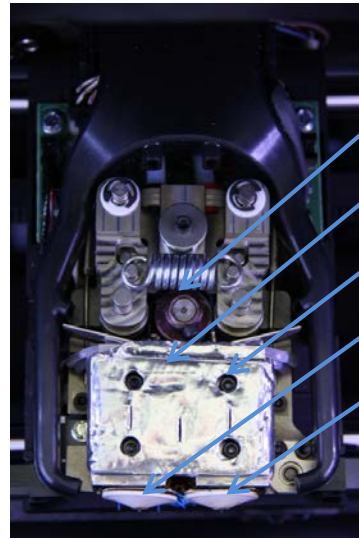
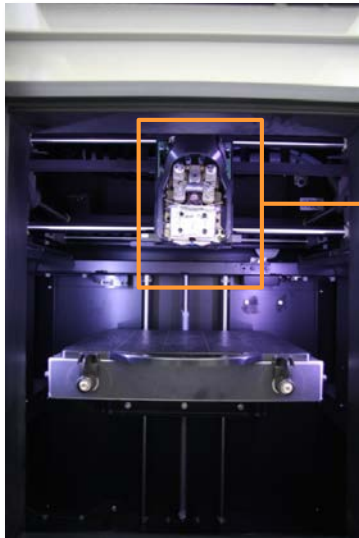


## 2.1 Urformen – Material extrusion

# AUFWÄRMPHASE



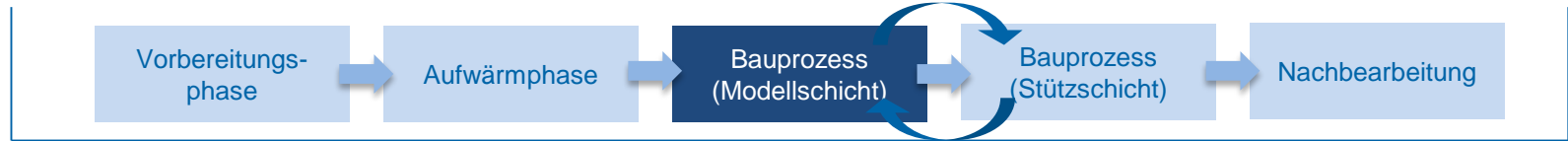
Einrichtung des Anlagensystems



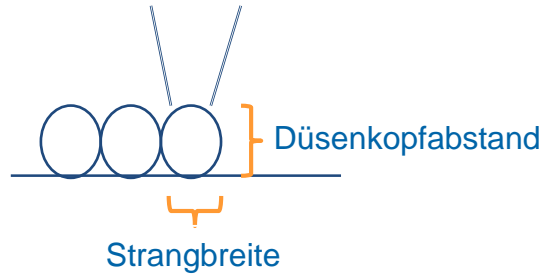
- Antriebsrolle
- Abdeckung
- Halteschrauben
- Modelldüse
- Stützmaterialdüse

## 2.1 Urformen – Material extrusion

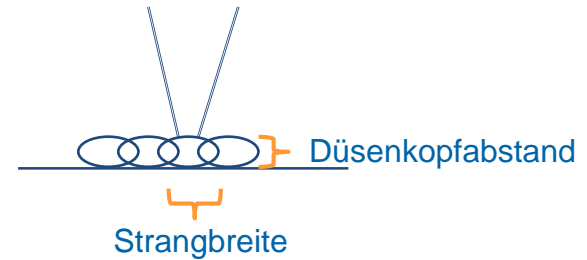
# BAUPROZESS



- Nivellierung der Bauplattform mit Auftragen einer Basisschicht
- Nach Auftragen einer Schicht folgt ein Absenken der Bauplattform um eine Schichtstärke und der Vorgang startet erneut
- Anschmelzen der darunter liegenden Schicht und somit Eingehen einer festen Verbindung (Schichtgenerierung)



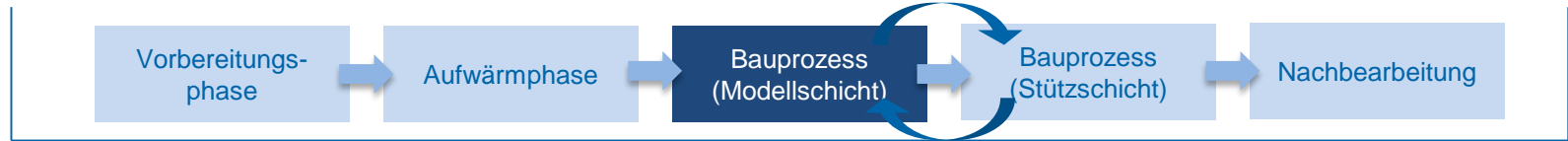
Falsch



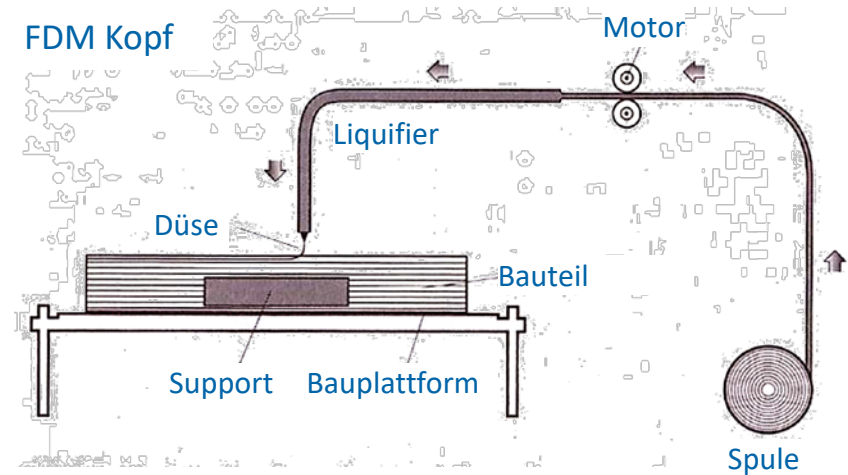
Richtig

## 2.1 Urformen – Material extrusion

# BAUPROZESS



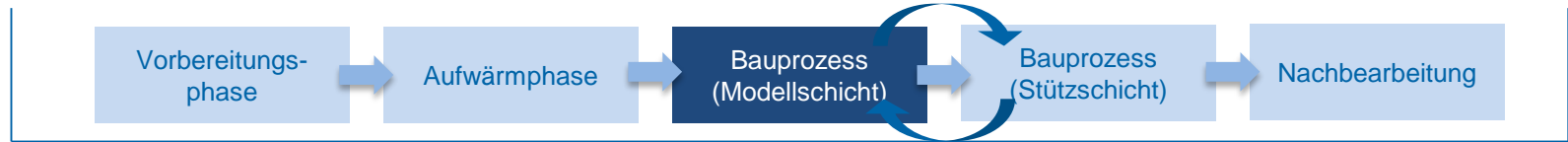
- Material (Thermoplast) wird geschmolzen und extrudiert
- Schichtstärken zwischen 0,1 mm – 0,4 mm
- Modell- und Stützmaterialdüse bewegen sich gemeinsam, werden aber separat und nacheinander angesteuert
- Hohe Prozessstabilität und Prozesssicherheit auf Kosten der Bauzeit
- Durch günstige Positionierung von Bauteilen ist eine Material- und Zeiteinsparung möglich



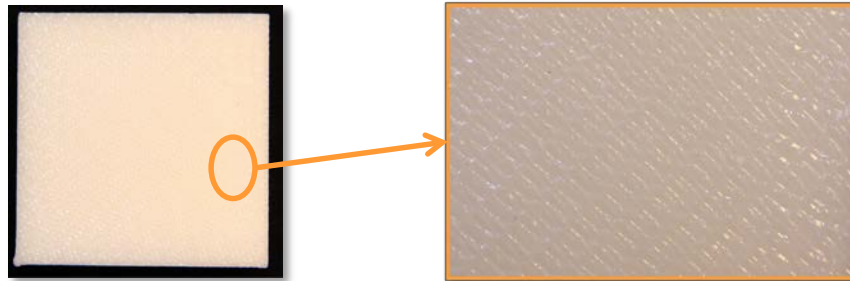
www.uni-due.de/fertigungstechnik

## 2.1 Urformen – Material extrusion

# BAUPROZESS



Innere Bereiche: Variante 1: vollgefüllt



Vorteile:

- + Sehr hohe Stabilität
- + Geringer Verzug

Nachteile:

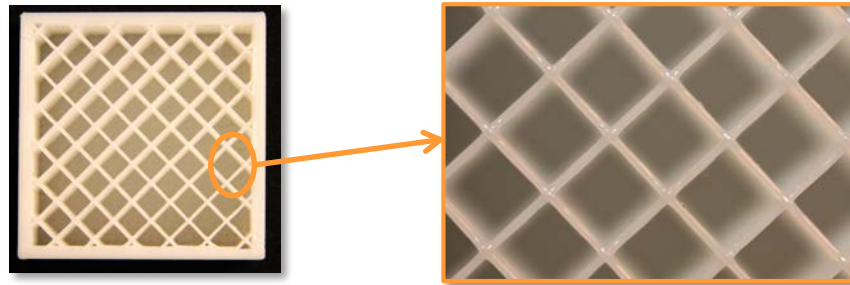
- Hohe Bauzeit
- Höheres Gewicht
- Hoher Materialverbrauch

## 2.1 Urformen – Material extrusion

# BAUPROZESS



Innerer Bereich: Variante 3: Sparse – niedrige Dichte



Vorteile:

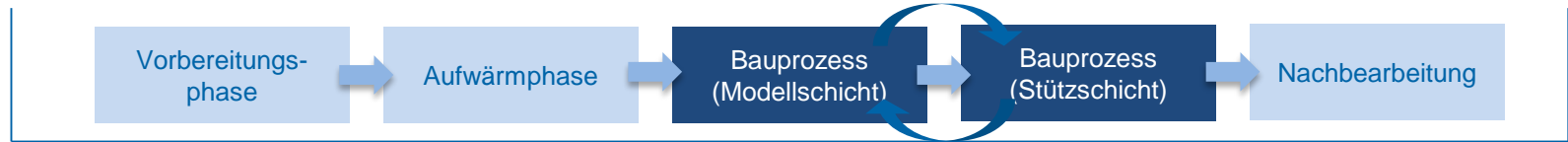
- + Sehr geringes Gewicht
- + Sehr geringe Bauzeit
- + Geringer Materialverbrauch

Nachteile:

- Hoher Verzug
- Niedrige Stabilität
- Mögliches „Einfallen“ der Oberflächen

## 2.1 Urformen – Material extrusion

# BAUPROZESS



### Einfluss der Modell- und Stützmaterialfüllung

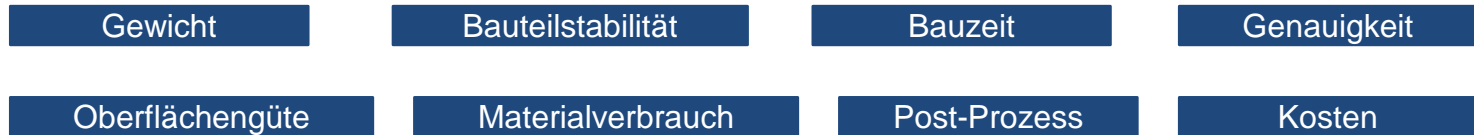
#### Modellfüllung

- Vollgefüllt
- Sparse - hohe Dichte
- Sparse - niedrige Dichte

#### Stützmaterial

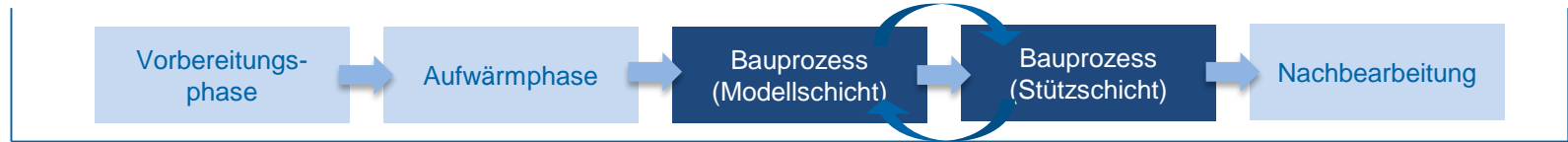
- Minimal
- Basic
- Teilgefüllt
- Surround support

Einfluss auf



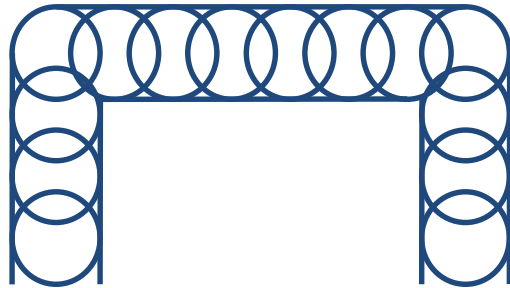
## 2.1 Urformen – Material extrusion

# BAUPROZESS



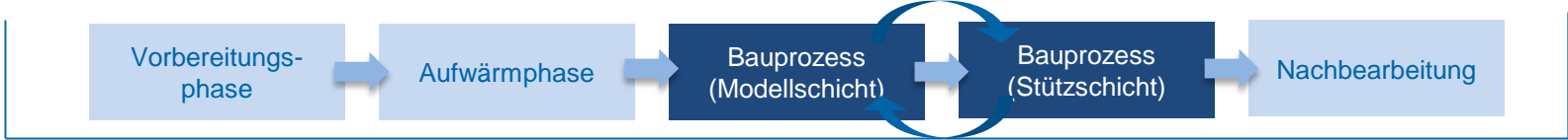
### Bauteilgenauigkeit

- Der extrudierte Strang besitzt einen kreisförmigen Querschnitt
- In Bezug auf den kreisförmigen Querschnitt sind keine äußeren Eckenabbildungen möglich



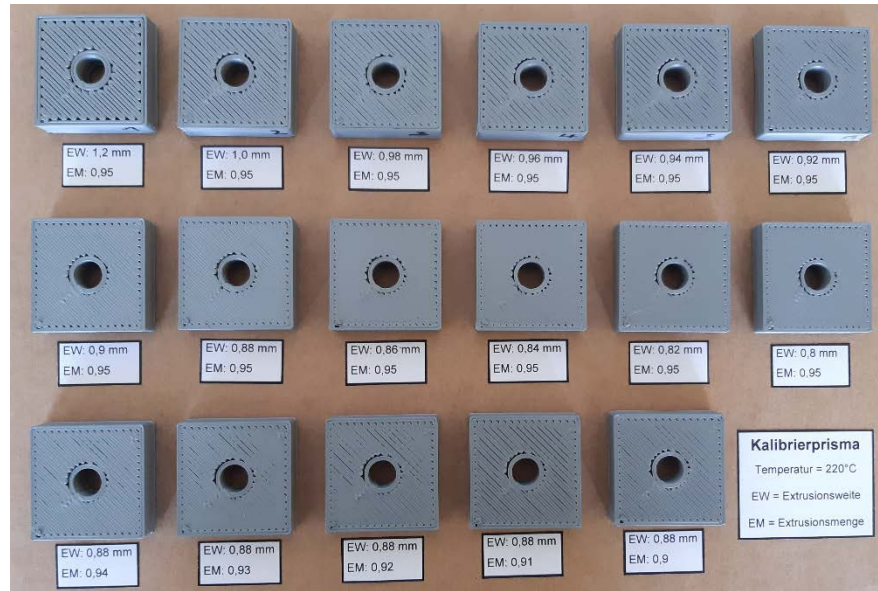
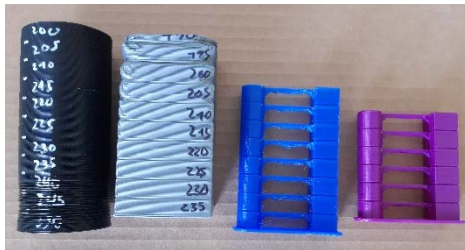
## 2.1 Urformen – Material extrusion

# BAUPROZESS



### Form- und Maßhaltigkeit

- Extrusionsparameter bestimmen das Fertigungsergebnis
- Abhängig von Maschineneigenschaften (z.B. Düsendurchmesser) und Werkstoffeigenschaften
- Vorversuche an Testteilen können Hinweise geben (z.B. Temperaturturm)



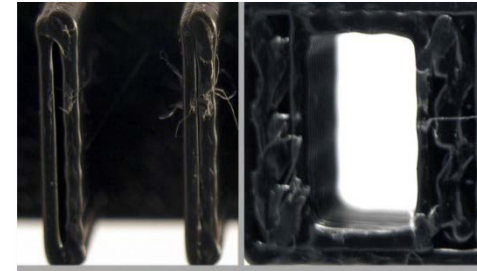
## 2.1 Urformen – Material extrusion

# BAUPROZESS



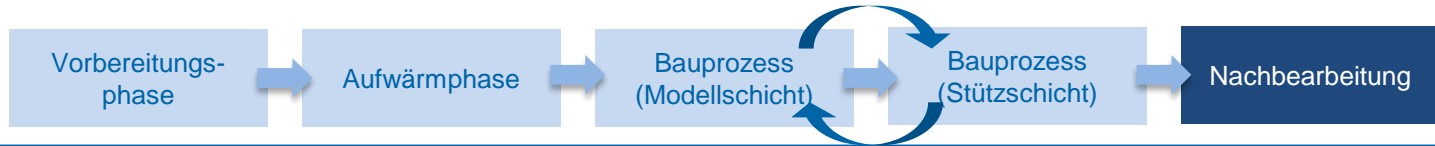
### Form- und Maßhaltigkeit

- Die minimale Auflösung wird durch die Schichtstärke reglementiert



## 2.1 Urformen – Material extrusion

# NACHBEARBEITUNG



Auswaschen der Stützen (setzt lösliches Supportmaterial voraus)

- Das Stützmaterial besteht aus einem im Vergleich zum Modellmaterial spröden, aber chemisch löslichen Werkstoff.

Entfernung des Stützmaterials durch:

- Mechanische Entfernung (Zangen etc.)
- Einlegen des Bauteils in ein basisches Reinigungsbad.
- Säurehaltiges Stützmaterial wird durch chemische Reaktion aufgelöst



## 2.1 Urformen – Material extrusion

# BEISPIELE

Werkzeugkiste ABS



Automobilrückleuchte ABS



Kaffeekanne Polycarbonat



Kupplungsprototyp



## 2.1 Urformen – Material extrusion

# VOR- UND NACHTEILE

- + Voll 3D-fähig
- + Gute technische Umsetzung
- + Einfache Handhabung und Lagerung der Materialien
- + Große massive Modelle möglich
- + (Einsatz im Büroumfeld möglich)
- Stützkonstruktionen notwendig (Zeit)
- Reinigungsprozess als Nachbearbeitungsschritt zur Entfernung der Stützkonstruktionen erforderlich
- Stabilität - Anisotropie
- Geringe Oberflächengüte und Detaillierungsgrad

## 2.1 Urformen – Material extrusion

# ANLAGEN

<b>Anlagentyp:</b>	Fortus 360mc
<b>Hersteller:</b>	Alphacam / Stratasys
<b>Bauraum:</b>	B 406 mm x H 356 mm x T 406 mm
<b>Schichtdicke:</b>	0,127 mm - 0,330 mm
<b>Gewicht:</b>	687 kg
<b>Abmessungen:</b>	1281 mm x 895.35 mm x 1962 mm



## 2.1 Urformen – Material extrusion

# ANLAGEN

<b>Anlagentyp:</b>	Fortus 900mc
<b>Hersteller:</b>	Alphacam / Stratasys
<b>Bauraum:</b>	914.4 mm x 609.6 mm x 914.4 mm
<b>Schichtdicke:</b>	0,178 mm - 0,330 mm
<b>Gewicht:</b>	3287 kg
<b>Abmessungen:</b>	2772 mm x 1683 mm x 2281 mm



## 2.1 Urformen – Material extrusion

# ANLAGEN

<b>Anlagentyp:</b>	Quadron 1001
<b>Hersteller:</b>	3Dimenzia
<b>Bauraum:</b>	1000 mm x 1000 mm x 1000 mm
<b>Schichtdicke:</b>	0,3 mm
<b>Gewicht:</b>	50 kg
<b>Abmessungen:</b>	1300 mm x 1300 mm 1300 mm





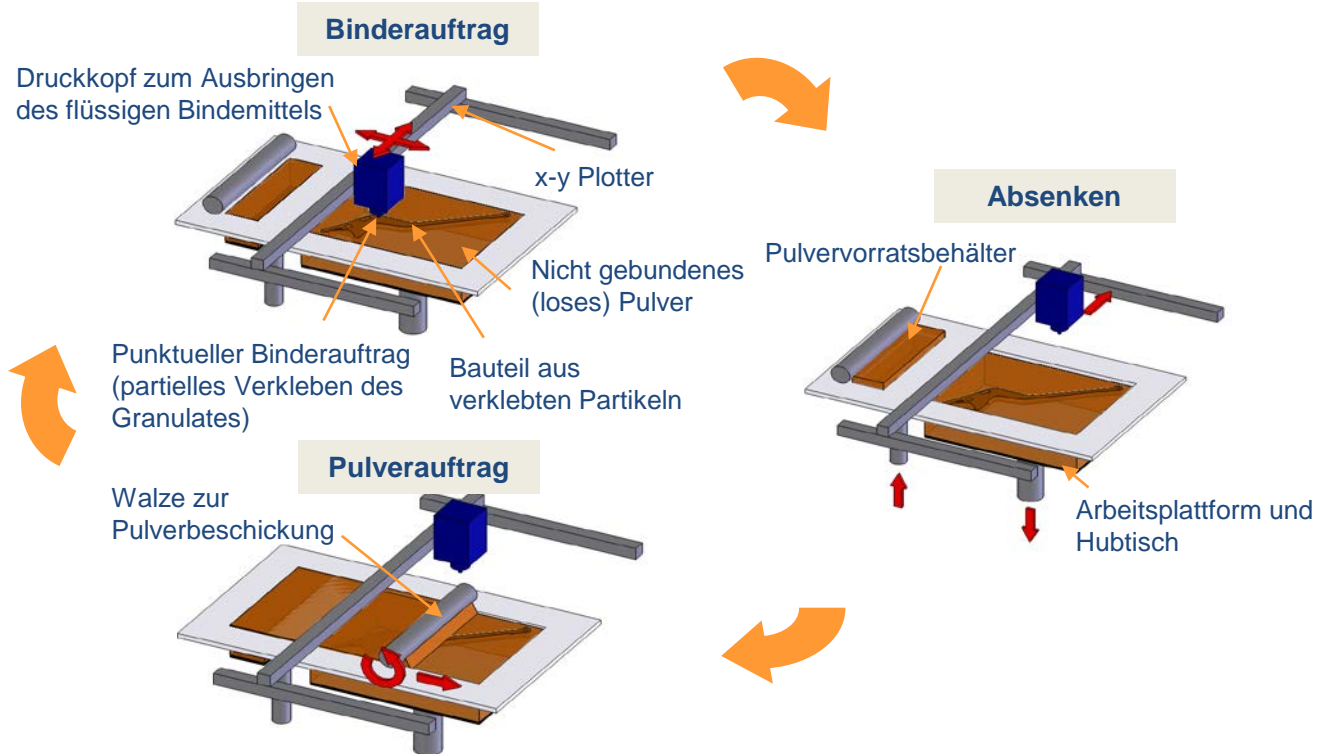
## 2.1 Urformen – Binder Jetting

# BINDER JETTING / 3DP: KURZBESCHREIBUNG

<b>Bauprozess</b>	Schicht-für-Schicht-Bauprozess durch Punkt-für-Punkt-Auftragen von Binder in ein Pulverbett oder Copolymerisierung von pulverförmigem Material
<b>Ausgangsmaterial</b>	Flüssig: Binder, wasser- oder lösemittelbasiert Pulverförmig: Pulvergemische (anorganische Pulver (Gips, Sand), Polymere, Metall, Keramiken, biobasierte Materialien etc.)
<b>Bindungsmechanismus</b>	chemisch (Vernetzung, Verklebung) und/oder physikalisch (thermisch, im Post-Prozess)
<b>Vorgehen bei Materialverarbeitung</b>	Vektor- oder (meist) <b>rasterorientiert</b>
<b>Aktivierungsenergie</b>	Je nach Binder rein chemisch, Wärme, UV-Strahlung
<b>Postprozess</b>	kontrolliertes Trocknen/Abkühlen, Auspacken, Reinigen mittels Druckluft Imprägnierung mit flüssigem Heißwachs oder Infiltrierung mit z.B. Epoxidharz, notwendig zur Erhöhung der mechanischen Belastbarkeit; Sintern (Keramik, Metall)

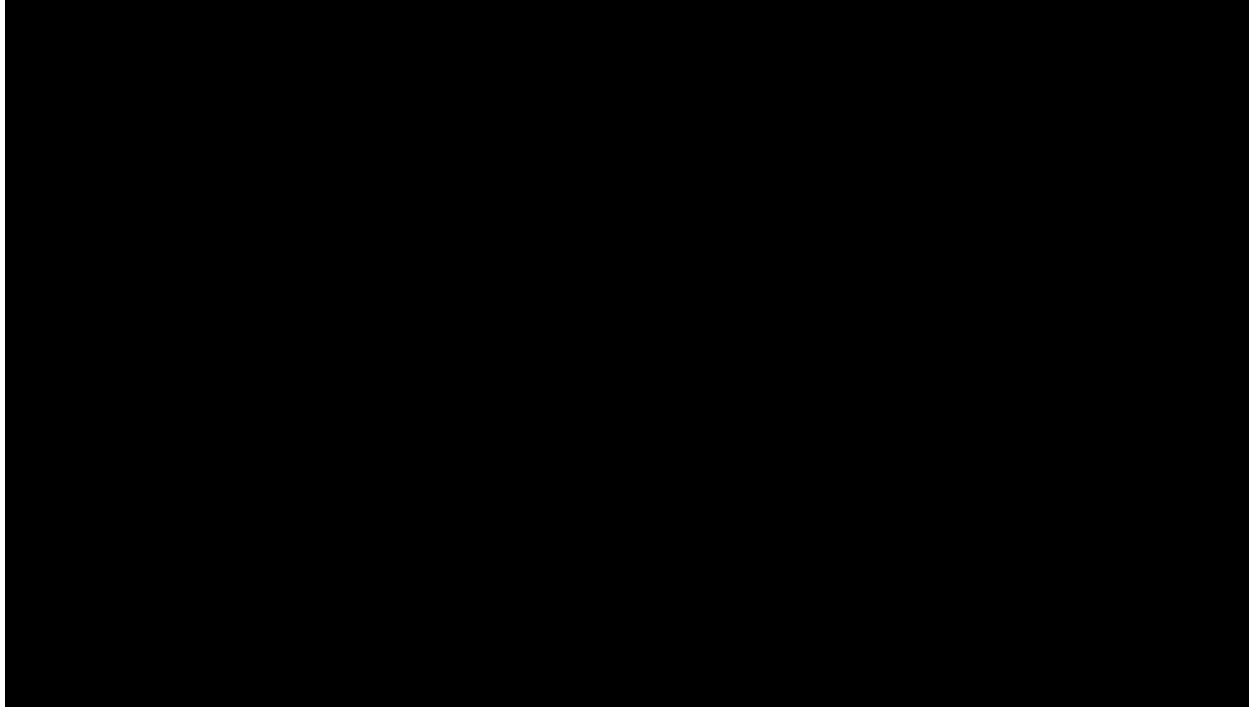
## 2.1 Urformen – Binder Jetting

# VERFAHRENSABLAUF



## 2.1 Urformen – Binder Jetting

# BINDER JETTING: ABLAUF (VIDEO)



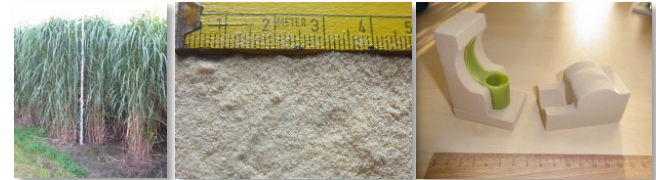
## 2.1 Urformen – Binder Jetting

# 3DP MIT NACHWACHSENDEN ROHSTOFFEN

- Nutzung von biobasierten und bioabbaubaren Materialien
- Upcycling von Reststoffen
- Lokal spezifisch vorhandene Rohstoffe
- ➔ Entwicklung von Pulver/Binder Kombinationen
- ➔ Entwicklung von Maschinenteknik (Materialvarianz/Bauteilgröße/Portabilität)
- ➔ Auslegung von Anwendungen



3D Printing mit nachwachsenden Rohstoffen (©BTE)

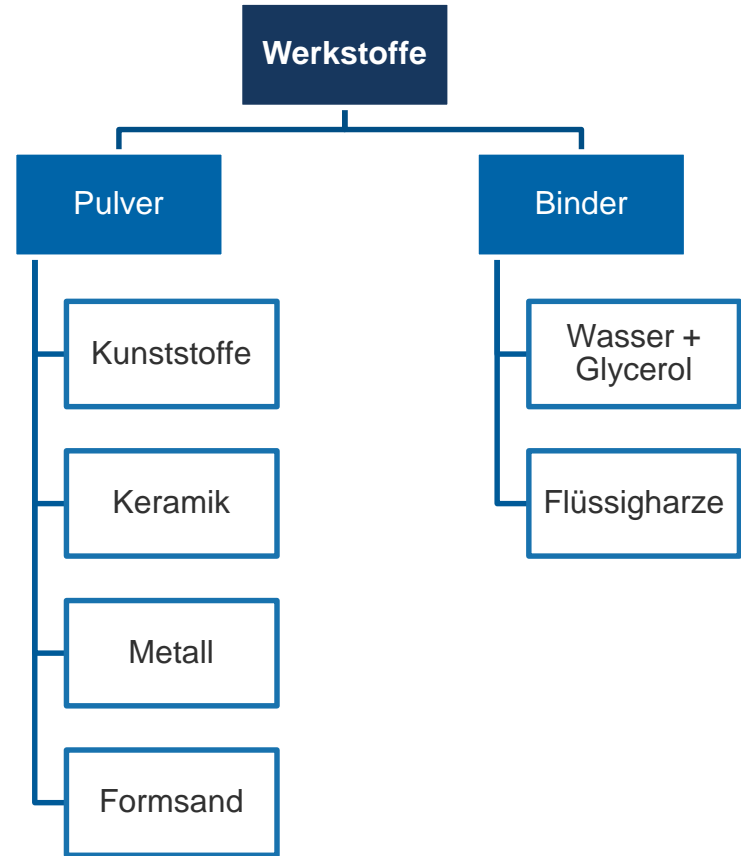


Miscanthusgras als Rohstoff für AM, Bauteil

## 2.1 Urformen – Binder Jetting

# WERKSTOFFE

- Bei Formsand wird zusätzlich ein Härter (Aktivator) eingemischt, der zur Festigkeit beiträgt, den Binder aufnimmt und somit eine selektive Festigung ermöglicht
- Das Verhältnis von Material zu Binder ist je Pulverwerkstoff unterschiedlich. So wird bei Kunststoffpulver ein Verhältnis von ca. 80:20 benutzt und bei Stahl von ca. 40:60.



## 2.1 Urformen – Binder Jetting

# ABLAUF: 1) AUSGANGSSTELLUNG



### Systemkomponenten

**Beschichter**

Zum Erstellen der Pulverschichten

**Beschichterbefüllung**

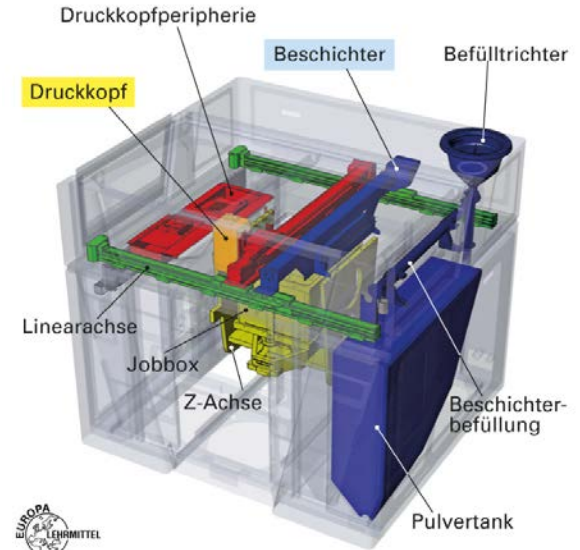
Zur Pulversversorgung der Pulverauftragskomponente

**Tanksystem**

Zur ausreichenden Bevorratung des Pulvers

**Formkasten**

(Jobbox) Als Bauraum, in dem die Teile erzeugt werden



## 2.1 Urformen – Binder Jetting

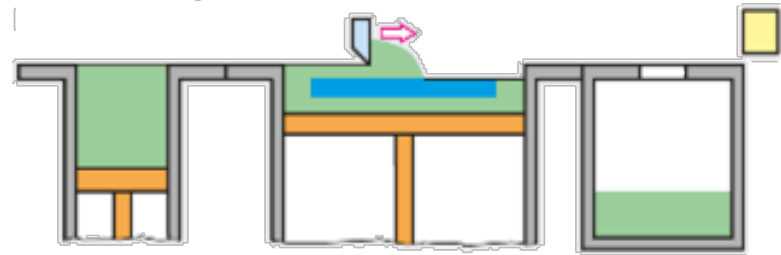
# ABLAUF: 2) BESCHICHTEN



### Beschichter Klinge/Rakel

- Eine vordosierte Menge Pulver wird mit Hilfe einer Klinge / eines Rakels über das Baufeld verteilt
- Überschüssiges Pulver fällt in einen Auffangbehälter und kann erneut genutzt werden
- Die erzeugbare Schicht hängt primär von der mittleren Korngröße des Pulvers ab (20 µm - 200 µm)
- Je nach Fließfähigkeit des Pulvers kommen verschiedene Rakelsysteme zum Einsatz (siehe auch nächste Folie)

### Pulverauftrag



### Pulverüberschuss abstreifen



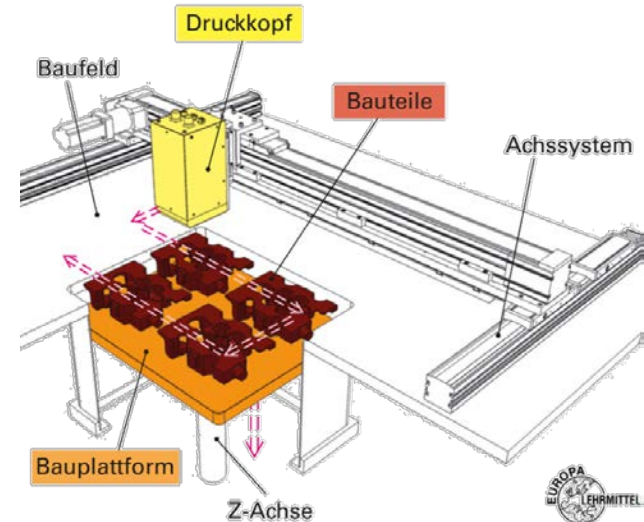
## 2.1 Urformen – Binder Jetting

# ABLAUF: 3) DRUCKEN



### Bedrucken der frisch aufgetragenen Schicht

- Der Druckkopf entspricht weitestgehend den tintenverdruckenden Druckköpfen im 2D-Druckverfahren.
- Der Druckkopf bewegt sich horizontal und relativ zur absenkbaren Bauplattform.
- Durch den Druckkopf werden feinste Tröpfchen eines flüssigen Materials aufgetragen.
- Pulverpartikel gehen durch die Benetzung mit dem Binderfluid eine feste Verbindung ein und formen so die physikalische Schicht



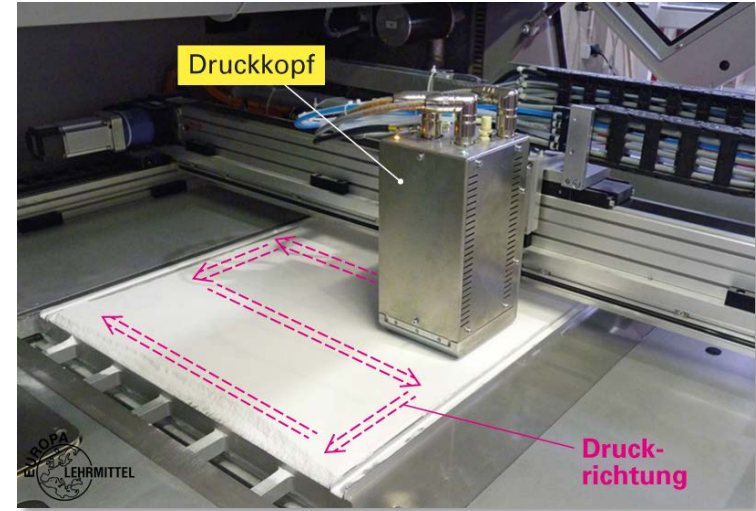
## 2.1 Urformen – Binder Jetting

# ABLAUF: 3) DRUCKEN



### Bedrucken der frisch aufgetragenen Schicht

- Das nicht bedruckte Pulver bleibt ungebunden und stützt die Bauteile
- Erstellung dünnwandiger, überhängender Teile möglich
- Stapelung mehrerer Bauteile übereinander



## 2.1 Urformen – Binder Jetting

# ABLAUF: 5) NACHBEARBEITUNG



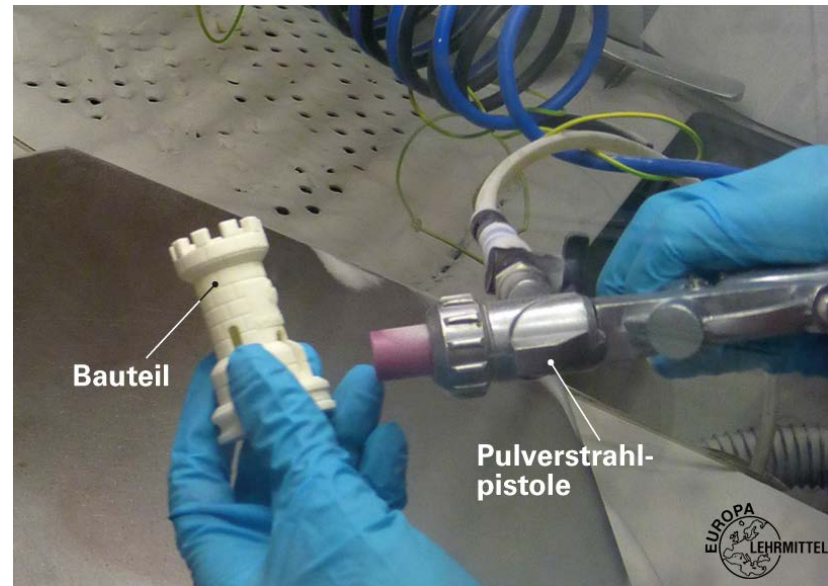
## 2.1 Urformen – Binder Jetting

# ABLAUF: 5) NACHBEARBEITUNG



### Finishing

- Durch den Druckprozess entstehen Anhaftungen von losem Pulver
- Entfernung erfolgt nach dem Entpacken durch Bürsten, Abblasen oder Pulverstrahlen



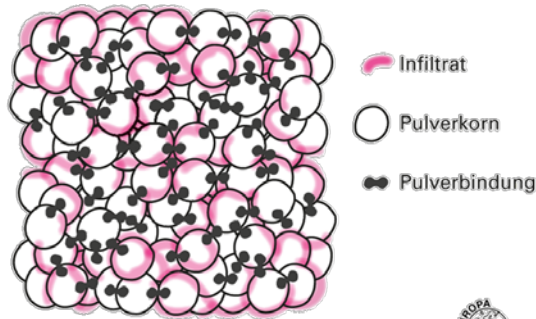
## 2.1 Urformen – Binder Jetting

# ABLAUF: 5) NACHBEARBEITUNG



### Infiltration

- Für höhere Festigkeitswerte können gedruckte Formteile infiltriert werden
- Eindringen von kriechfähigen Harzen in die Hohlräume



## 2.1 Urformen – Binder Jetting

# ABLAUF: 5) NACHBEARBEITUNG



### Infiltration

- Das Infiltrieren erfolgt über Tauchen oder durch direkten Auftrag mit Pinseln

#### Wachsbadtauchen eines Feingussmodells

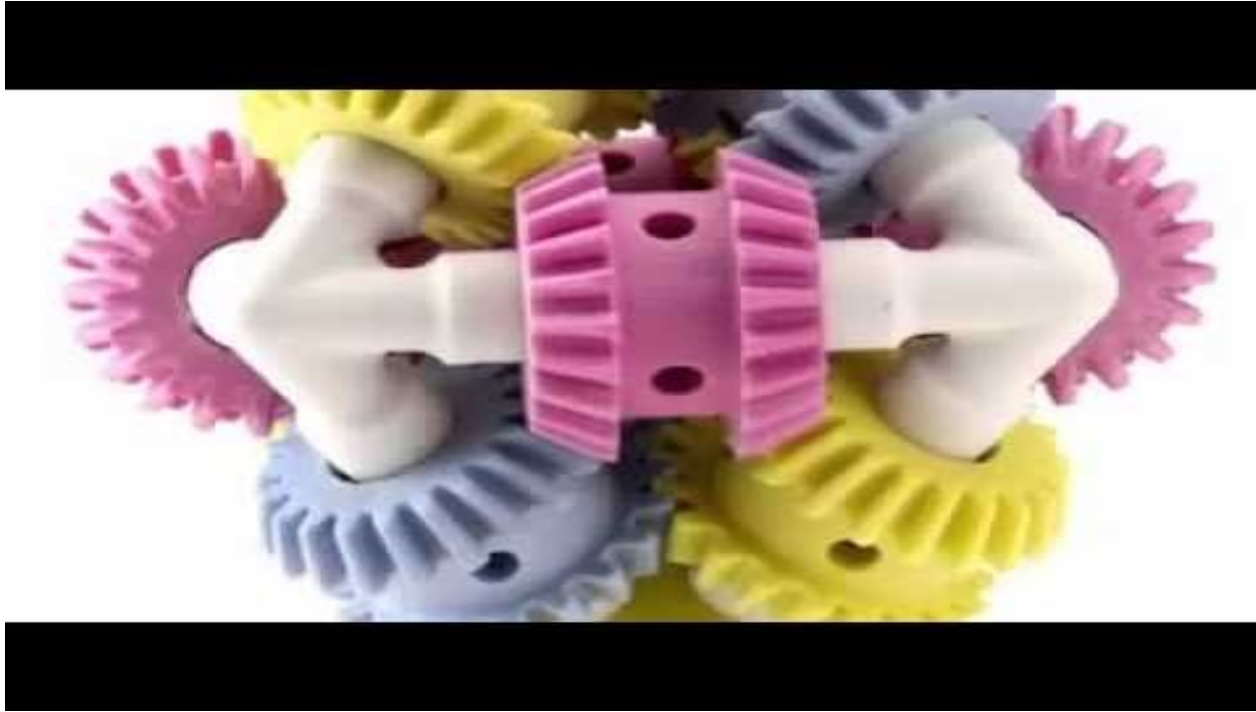


#### Bepinseln eines Funktionsmodells mit PU-Harz



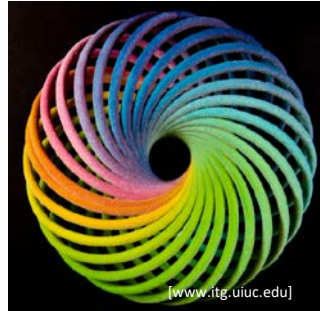
## 2.1 Urformen – Binder Jetting

# FARBDRUCK MÖGLICH



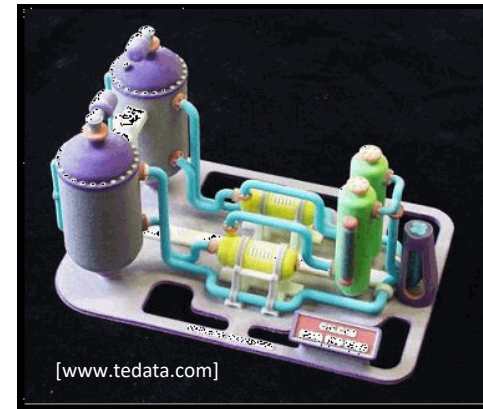
## 2.1 Urformen – Binder Jetting

# PRODUKTBEISPIELE 1



## 6 Additive Fertigungsverfahren – Binder Jetting

# PRODUKTBEISPIELE 2



## 2.1 Urformen – Binder Jetting

# VOR- UND NACHTEILE

- ⊕ Geringe Investitionskosten/ geringer Modellpreis
- ⊕ Sehr schnelle Erstellung von Konzeptbauteilen möglich
- ⊕ Keine Stützstrukturen erforderlich, da das Pulver das Bauteil hinreichend abstützt
- ⊕ Farbige Bauteile (auch mehrfarbig)
- ⊕ Theoretisch unbegrenzte Materialauswahl (wesentlicher Einfluss infolge des Binders, nicht nur durch das Ausgangsmaterial)
- ⊖ Mechanische Festigkeit / Einsetzbarkeit der Modelle ohne Post-Prozess begrenzt
- ⊖ Pulver/Binder-Kombination entspricht i.d.R. nicht verbreiteten Serienwerkstoffen
- ⊖ Nachbearbeitung für verbesserte Haltbarkeit erforderlich
- ⊖ Teilweise zweistufiges Verfahren;  
2. Stufe: Austreiben des Binders und Sintern des Bauteils
- ⊖ Problem bei zweistufigen Prozess:  
Schrumpfung

## 2.1 Urformen – Binder Jetting

# ANLAGEN

<b>Anlagentyp:</b>	ProJet 4500
<b>Hersteller:</b>	3D Systems
<b>Bauraum:</b>	203 mm x 254 mm x 203 mm
<b>Schichtdicke:</b>	0,1 mm
<b>Baufortschritt:</b>	8 mm/h
<b>Auflösung:</b>	600 dpi x 600 DPI
<b>Abmessungen:</b>	1620 mm x 800 mm x 1520 mm



[[www.3dsystems.com](http://www.3dsystems.com)]

www.uni-due.de/fertigungstechnik | [3D Systems]

## 2.1 Urformen – Binder Jetting

# ANLAGEN

<b>Anlagentyp:</b>	VXC800 (kontinuierlich arbeitend)
<b>Hersteller:</b>	Voxeljet
<b>Bauraum:</b>	850 mm x 500 mm x 1500/ 2000 mm
<b>Schichtdicke:</b>	150 - 400 $\mu\text{m}$
<b>Baufortschritt:</b>	35 mm/h
<b>Abmessungen :</b>	4000 mm x 2800 mm x 2200 mm
<b>Gewicht:</b>	2500 kg





Additive Fertigung

# FERTIGUNGSTECHNIK 20/21 – 06

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

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



**imkf**  
INSTITUT FÜR MASCHINENELEMENTE  
KONSTRUKTION UND FERTIGUNG



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