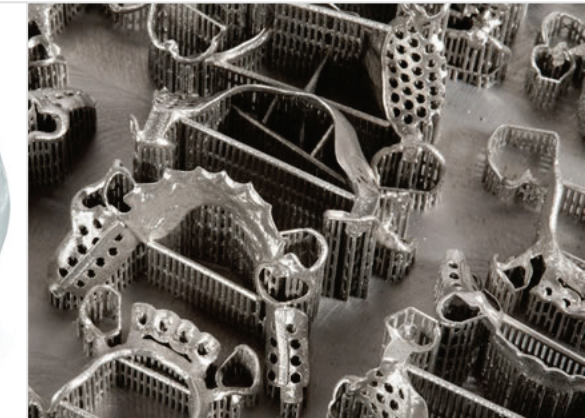
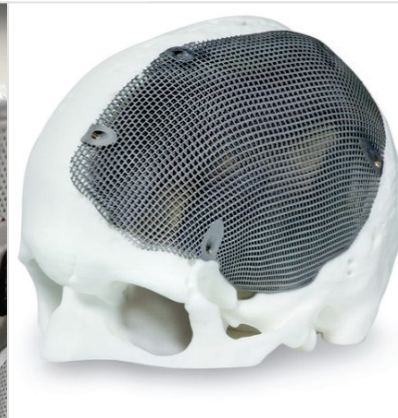
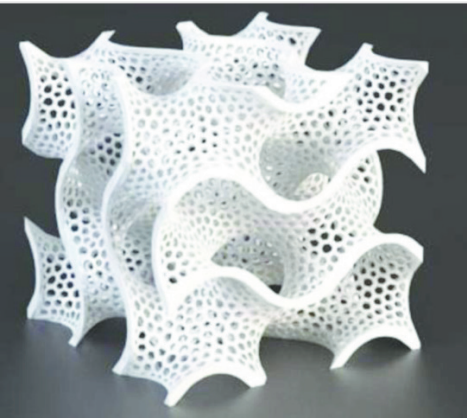


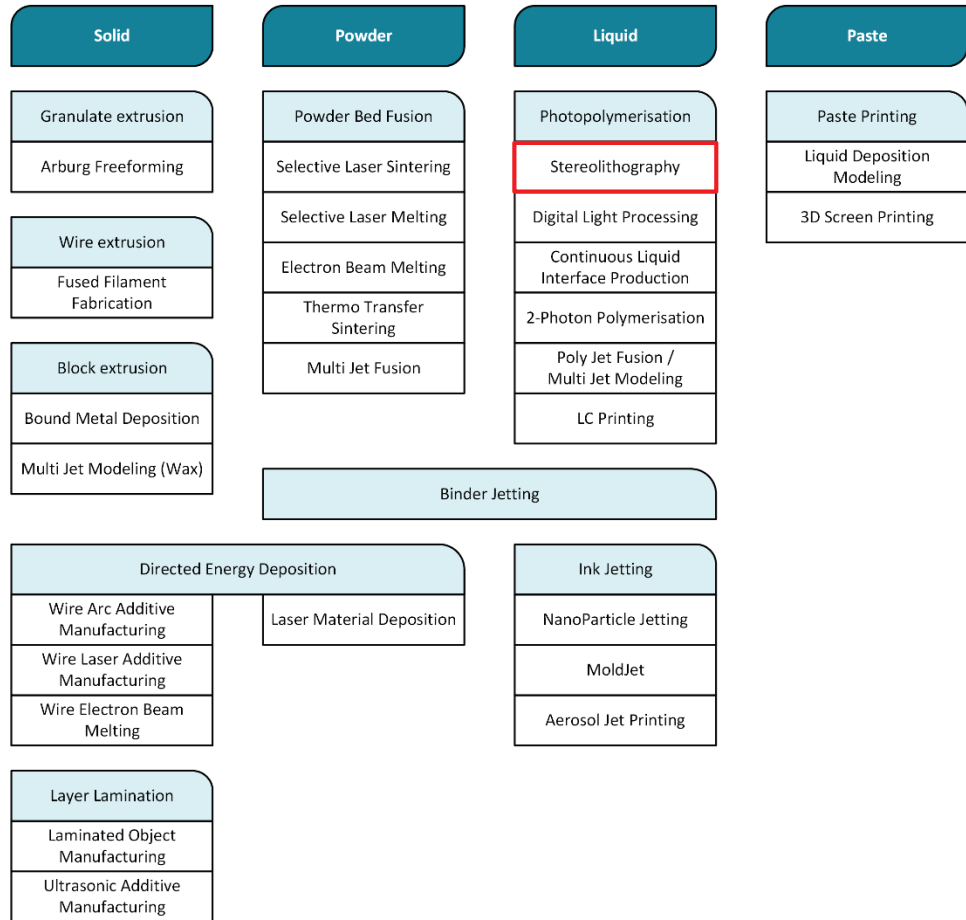
# ADDITIVE FERTIGUNG – PHOTO- POLYMERISATION – II - STEREOLITHOGRAPHIE



Sommersemester 2021

# PHOTO-POLYMERISATION

Definition nach ISO/DIS 17296-1:  
 “additive manufacturing process in which liquid polymer in a vat is selectively cured by light-activated polymerization“



# STEREOLITHOGRAPHIE - VIDEO



## 6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

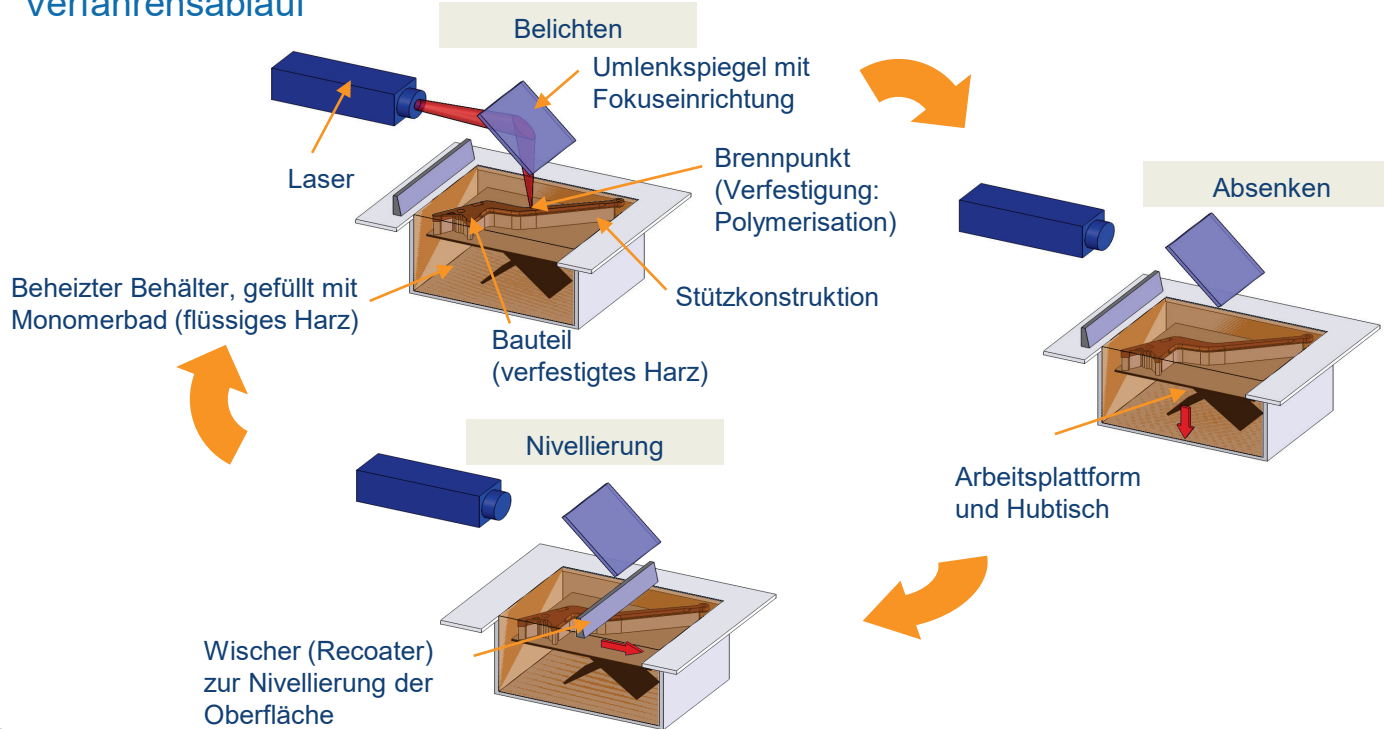
# SLA: KURZBESCHREIBUNG

<b>Bauprozess</b>	Schicht-für-Schicht-Bauprozess durch lokales Verfestigen von Monomer-Kunstharzen (mit Fotoaktivatoren) unter Einwirkung von Laserlicht
<b>Ausgangsmaterial</b>	Flüssig bis pastös: UV-aktivierbare Kunstharze 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>

## 6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

# SLA: KURZBESCHREIBUNG

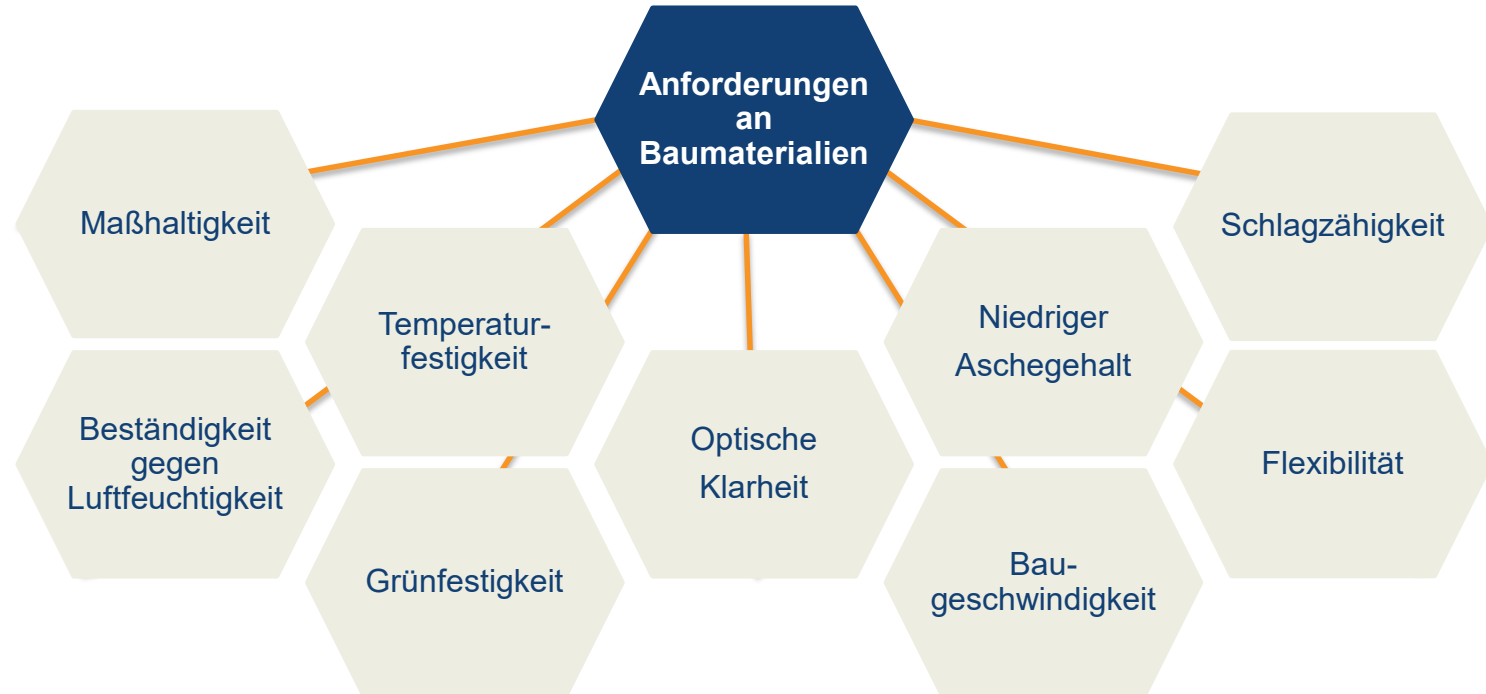
### Verfahrensablauf



## 6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

# BAUMATERIALIEN

Entwicklung einer Vielzahl von Acrylaten und Epoxidharzen



## 6 Additive Fertigungsverfahren – 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

## 6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

# BAUMATERIALIEN

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

- Un- oder niedrig vernetzte Monomere
- Mit geeigneten Photo-Inhibitoren durchsetzt
- Große Farbauswahl von nahezu transparent bis farbig
- Flexibel
  
- Harz muss auf einer Verarbeitungstemperatur von ca. 25 bis 30°C gehalten werden um optimales Fließverhalten beim Materialauftrag zu gewährleisten
- Bei der Verfestigung tritt eine Verdichtung des Materials auf welche zu durch Spannung induzierte Risse und Schrumpfungen im Bereich von 0,06 % und 0,6 % führen kann



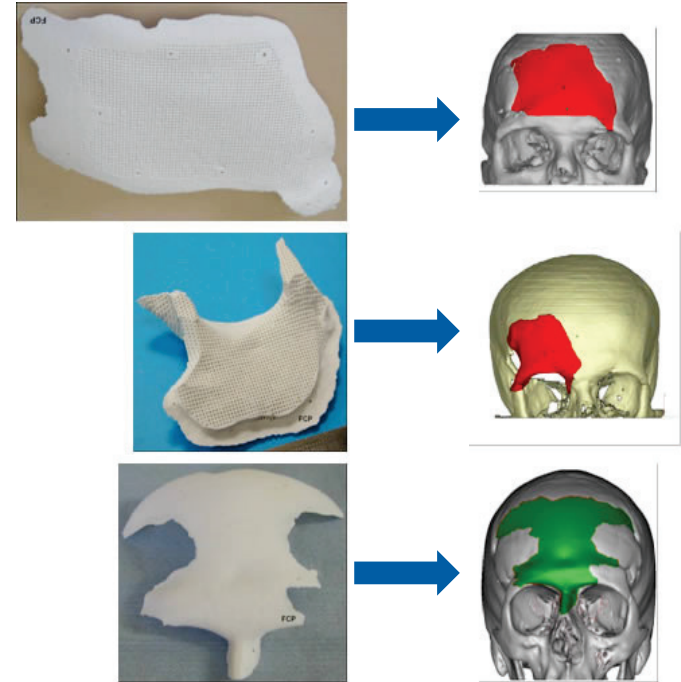
## 6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

# 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



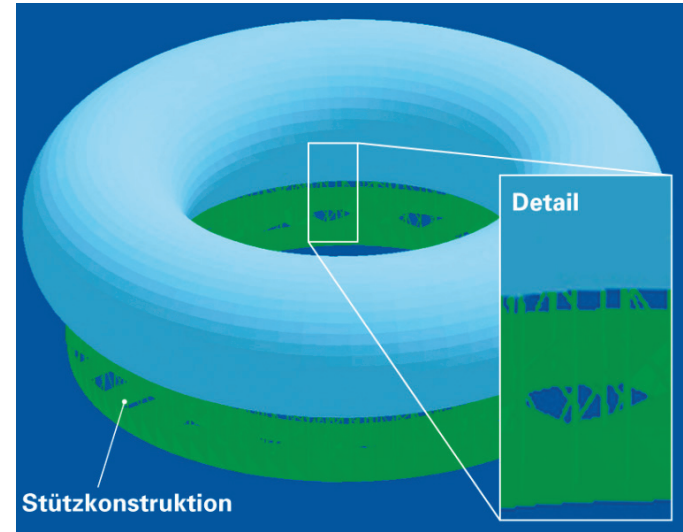
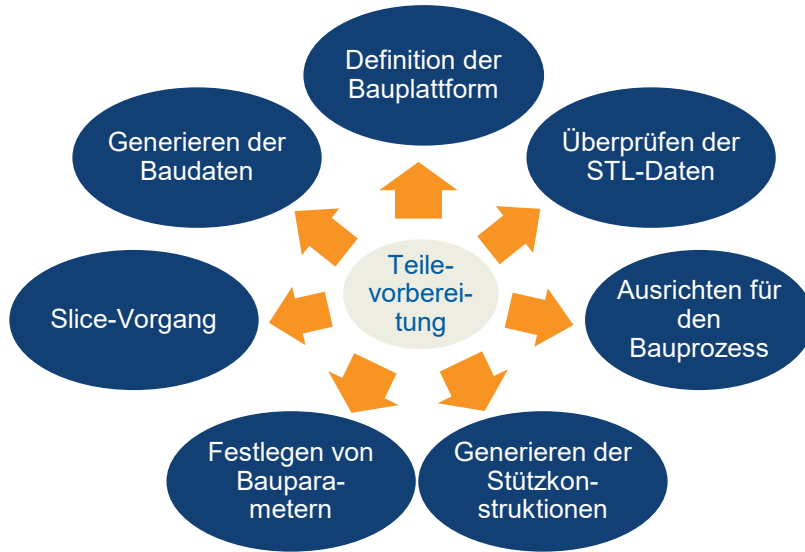
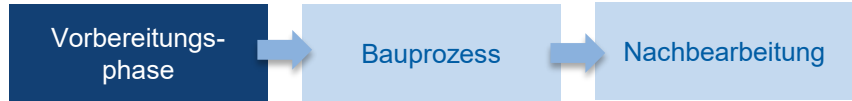
www.uni-due.de/fertigungstechnik | Rtejournal 2007

# 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						●●●●●

# VORBEREITUNGSPHASE

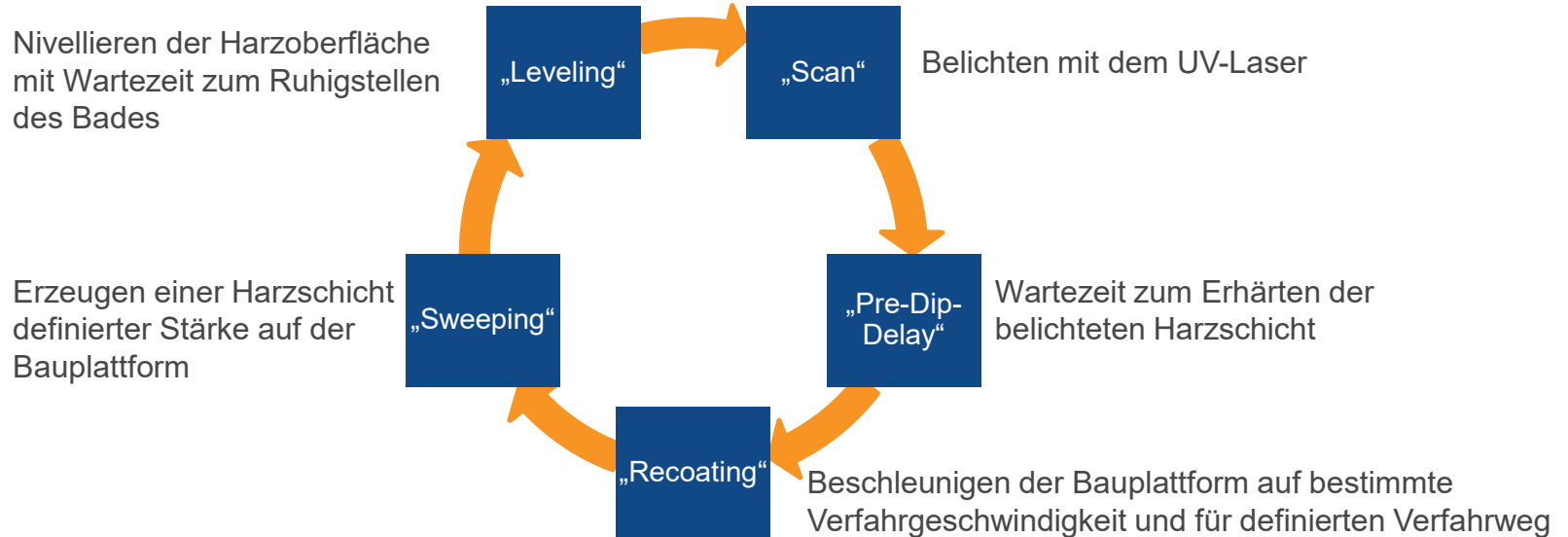


## 6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

# BAUPROZESS



### Abfolge in der Maschine



## 6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

# BAUPROZESS

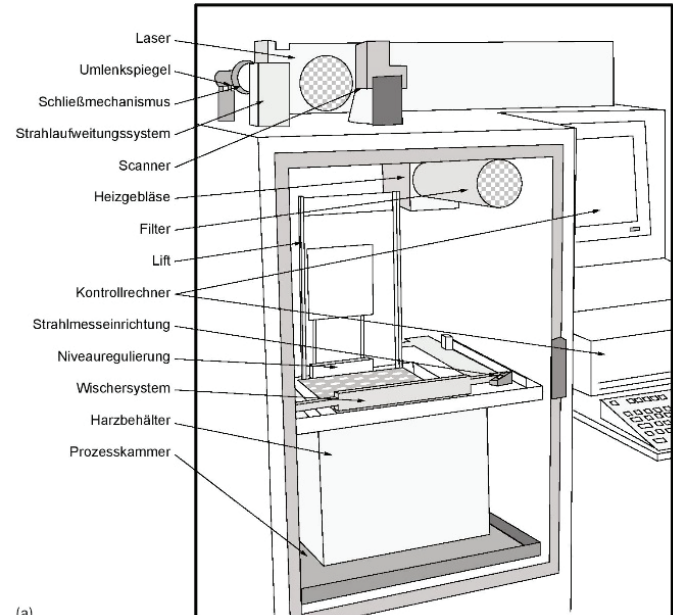
Vorbereitungs-  
phase

Bauprozess

Nachbearbeitung

### 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)

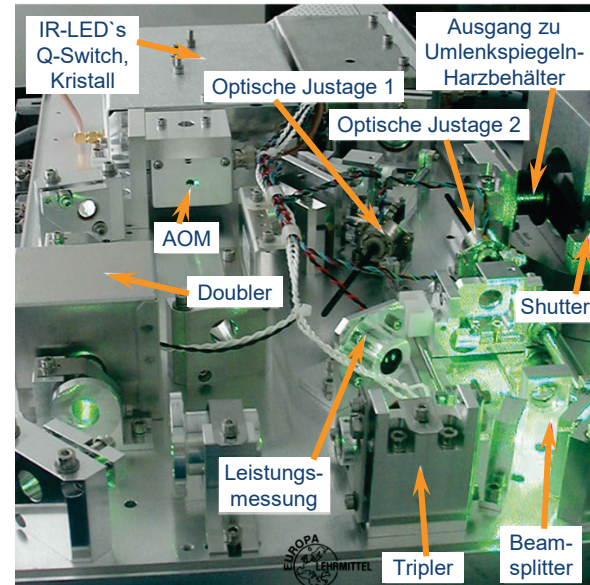
## 6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

# BAUPROZESS



### Aufbau der Laseroptik

- Nd:YVO4-Festkörperlaser
- Im Q-Switch gepulster Laser
  - Akusto-optischer Modulator (AOM)
  - Impulsweiten im Nanosekundenbereich
  - Infrarot-Wellenlänge von 1064 nm wird über Frequenzverdoppelung und –verdreifachung in die für die Stereolithografie spezifische Wellenlänge von 355 nm umgewandelt.



www.uni-due.de/fertigungstechnik

## 6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

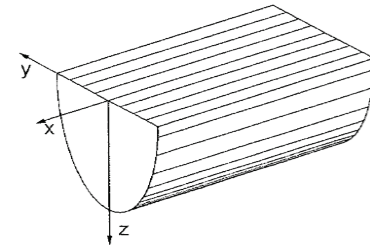
# BAUPROZESS



### Prinzip der Schichtgenerierung

- Der Polymerisationsgrad ist abhängig von der Anzahl der Photonen
- Bei einer bestimmten Photonenzahl (kritischen Flächenenergie) reagieren so viele Photonen mit dem Harz, dass es vom flüssigen in den festen Zustand überführt wird (Gel-Punkt)
- Bestimmung von Breite und Form der ausgehärteten Spur unter Einbeziehung der Intensitätsverteilung im Gauß-Strahl -> Aushärtspur besitzt die Form eines parabolischen Prismas

Parabolische Form der Aushärtspur bei Einwirkung eines Gauß-Strahls:

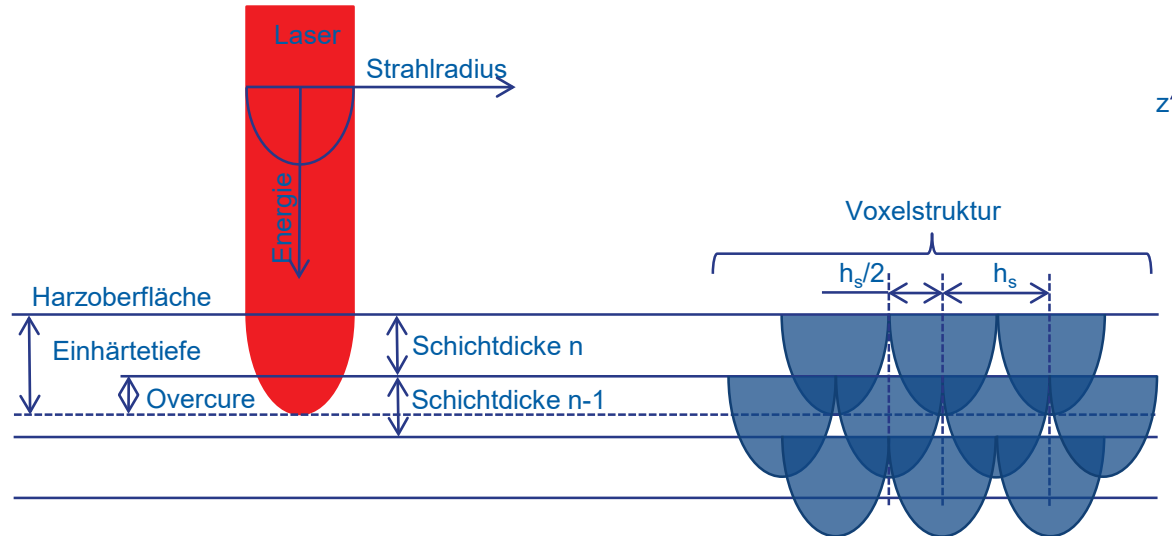


## 6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

# BAUPROZESS



### Einwirkung des Laserstrahls auf die Harzoberfläche



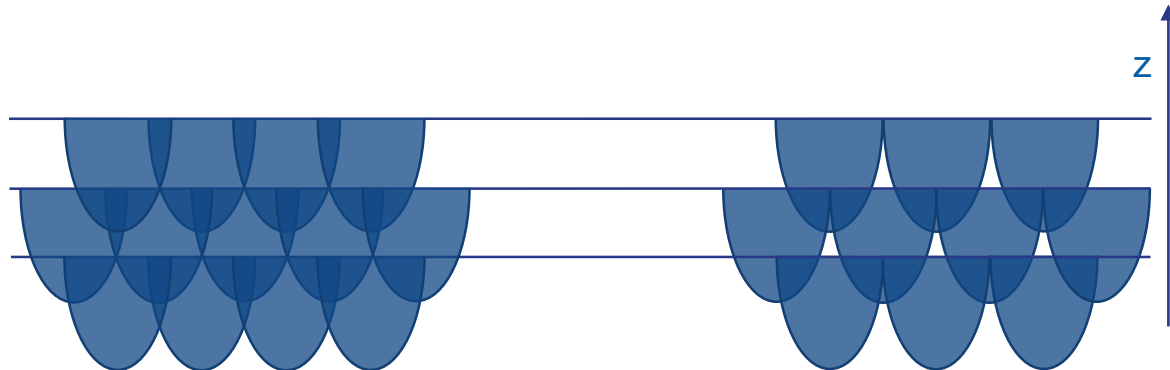
## 6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

# 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 abgefahrte Scanlinie mit den angrenzenden Linien zu verbinden



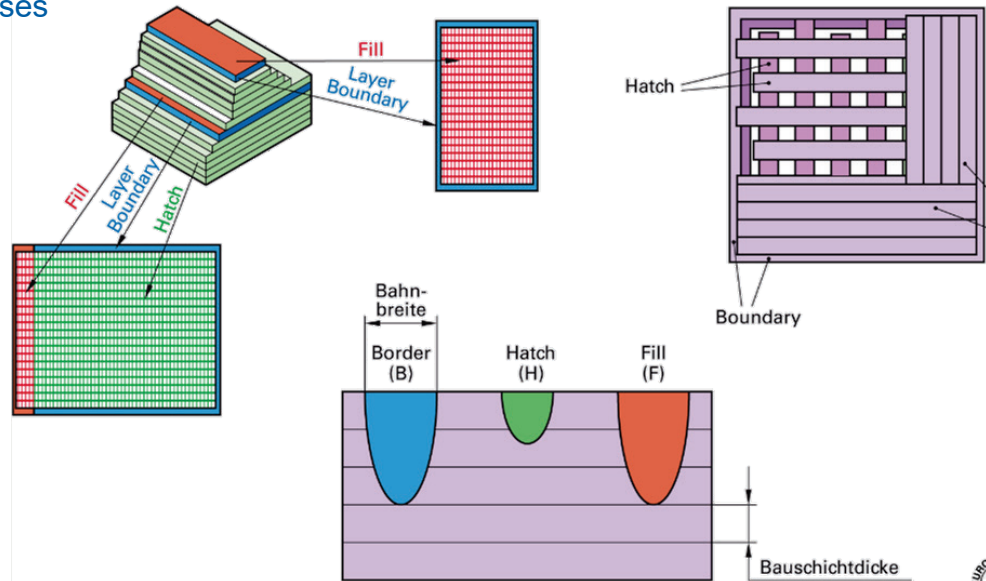
## 6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

# BAUPROZESS



### Bauparameter des Stereolithographieprozesses

- B – Boundary  
= Konturbegrenzung
- H – Hatch  
= Verfestigen im Schichtinneren
- F – Fill  
= Boden- und Deckflächen



www.uni-due.de/fertigungstechnik | [A. Gebhardt: Generative Fertigungsverfahren]

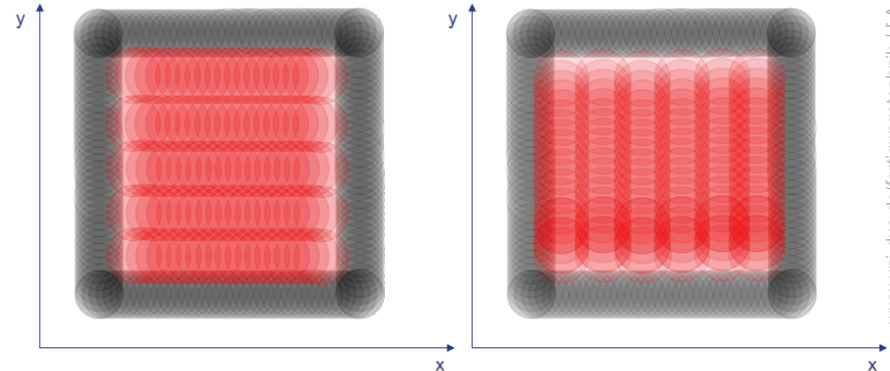
## 6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

# BAUPROZESS



### Scanstrategien

- Häufig wird bei der Generierung einer Schicht zunächst die Bauteilberandung (Borders) verfestigt
- Anschließend findet eine Verfestigung des Bauteilinneren durch geeignete Schraffuren (Hatch) statt
  
- Je nach Anlage können für die Border- und Hatchbelichtung die Parameter für das Belichtungsmuster, das Overcure und die Eindringtiefe eingestellt werden



## 6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

# BAUPROZESS



### Unterscheidung zwischen Baustilen

ACES	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hatch-Bahnen überlappen sich, es kommt zu einer vollständigen Aushärtung des Baumaterials in der Stereolithographiemaschine.</li> </ul>
Cyclic Styles	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ In einer wiederholten Folge von mehreren Bauschichten wird nur in einer Ebene der Hatchabstand ausgeführt, ansonsten nur Boundary und Fill.</li> </ul>
Thin Layers	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sehr feine Schichten werden gefertigt.</li> </ul>
FAST	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ein größerer Hatchabstand wird eingestellt.</li> </ul>
EXACT	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ein engerer Hatchabstand wird eingestellt.</li> </ul>
Quick Cast	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Es wird eine Wabenstruktur hergestellt, aus der nach Fertigstellung des Teils das flüssig gebliebene Harz abfließen kann.</li> </ul>

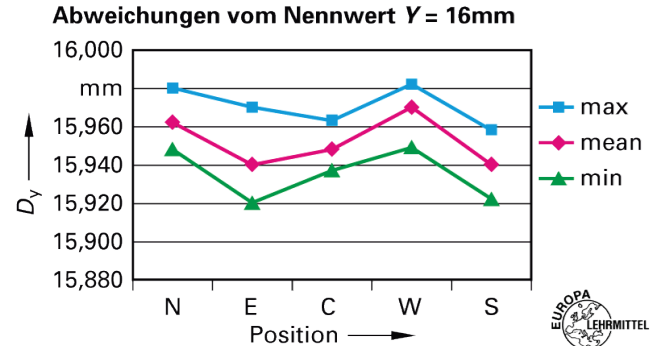
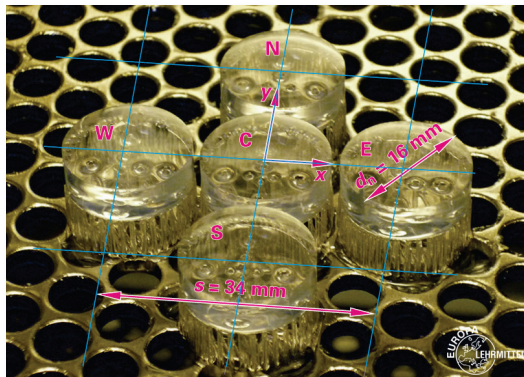
## 6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

# 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



## 6 Additive Fertigungsverfahren – 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

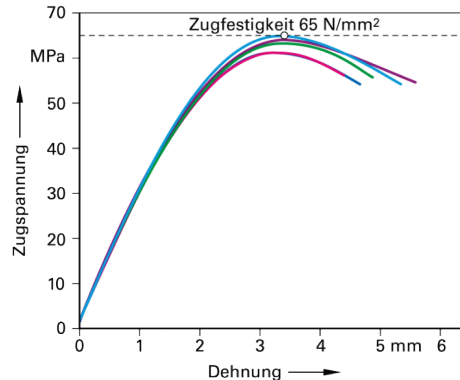
## 6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

# BAUPROZESS



### Festigkeit

- Am Beispiel des Werkstoffes Accura 60, 3D Systems Inc.

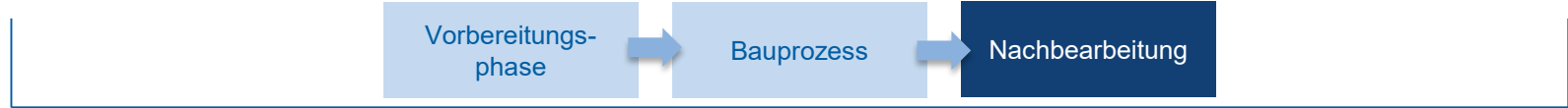


Kennwert	Wert
Eindringtiefe (Dp)	6,3 mm
Kritische Energie (Ec)	7,6 mJ/cm <sup>2</sup>
Viskosität des flüssigen Harzes (30 °C)	150-180 cps
E-Modul	2690-3100 MPa
Zugfestigkeit	58-68 MPa
Bruchdehnung	5-13 %
Kerbschlagzähigkeit (Izod)	15-25 J/m
Glasübergangstemperatur (Tg)	58 °C
Wärmeformbeständigkeit	53-55 °C

- Bei gründlicher und gleichmäßiger Aushärtung durch UV-Licht Bestrahlung werden die höchsten mechanischen Kennwerte erreicht

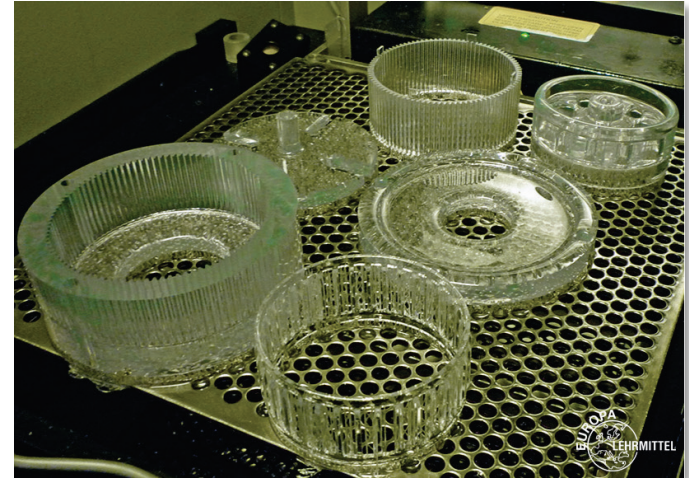
## 6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

# NACHBEARBEITUNG



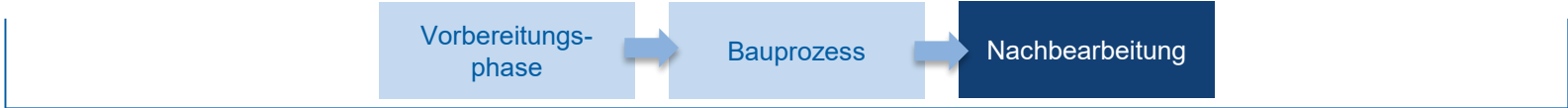
### Bauteile auf ausgefahrener Bauplattform

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



## 6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

# NACHBEARBEITUNG



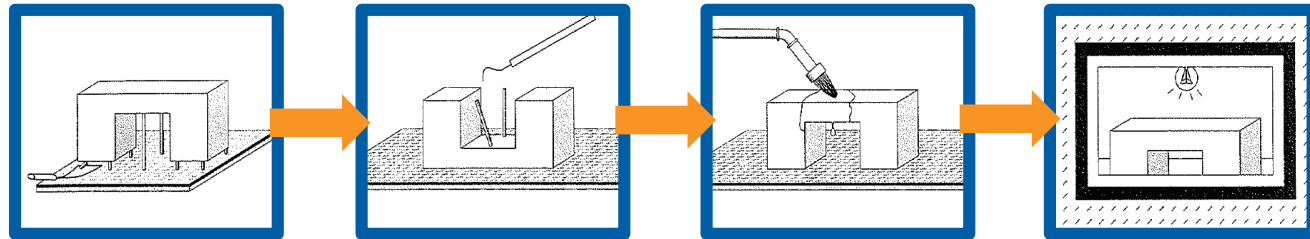
### Entfernung der Stützkonstruktionen

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

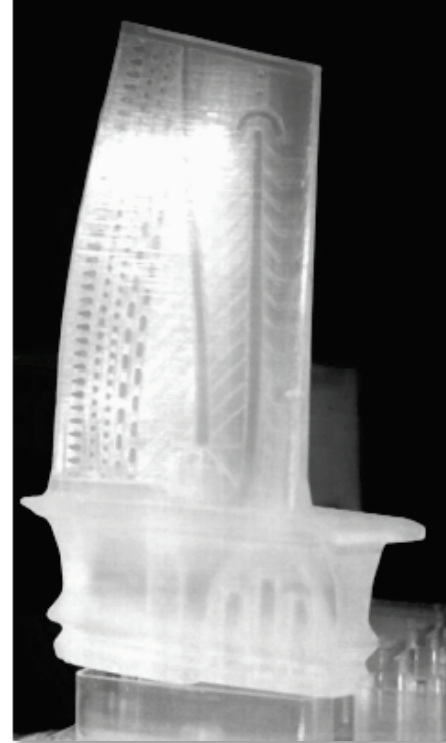
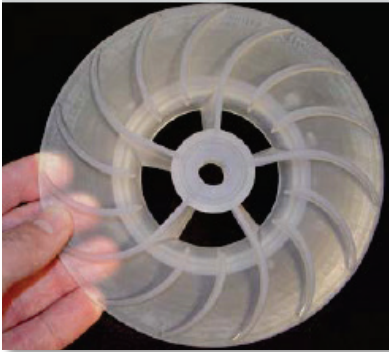
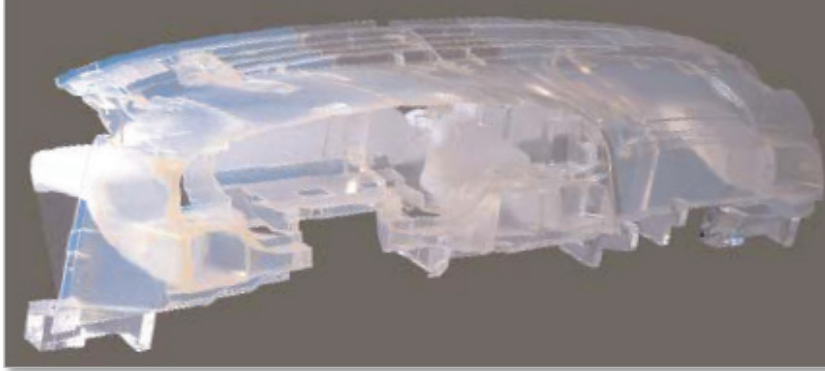


### Nachvernetzung

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



# PRODUKTBEISPIELE



## 6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

# PRODUKTBEISPIELE

Beispiele für Medizinische Anschauungs- und Geometriemodelle

Rekonstruktion eines Neandertaler-Schädels



Zahn-/Dentalmodelle



## 6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

# PRODUKTBEISPIELE

Beispiele für keramische SLA-Teile

### USB-Stick-Anhänger:

- ZrO<sub>2</sub>
- Komplexe Geometrie
- Fügen mit anderen Materialien (USB-Stick, Holz) möglich



### Rosen als Zierelement für Schmuck:

- ZrO<sub>2</sub>
- Komplexe Geometrie
- Keramikpulver durch Zugabe von verschiedenen Stoffen färbbar



[www.3DCream.com]

## 6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

# SLA: VOR- UND NACHTEILE

- + Derzeit eines der genauesten Verfahren; Einschränkungen sind maschinenbedingt (nicht verfahrensbedingt, vgl. Gebhardt)
- + Hohe Bauteilkomplexität darstellbar
- + Bauteilinterne Hohlräume möglich
- + Transparente Materialien möglich
- + Komplexe Modelle können aus mehreren Teilen zusammengesetzt werden, ohne dass die Trennstellen sichtbar sind (erfordert entsprechenden Kleber)
- + Lackierung möglich
- + Mechanische Bearbeitung möglich
- + Nicht benötigtes flüssiges Material kann wiederverwendet werden
- Spezielles photosensitives Material erforderlich
- Geringe thermische und mechanische Belastung im Vergleich zu anderen Verfahren
- Stützkonstruktionen erforderlich
- Treppenstufeneffekt
- Finishing erforderlich (z. B. Polieren)
- Zweistufiges Verfahren: 95 % Verfestigung durch Laser, anschließend Nachvernetzung erforderlich (Wärmebehandlung)
- Absaugung erforderlich (beim Bauprozess entstehen gesundheitsschädliche Gase)
- Modelle neigen zum Kriechen
- Harze sind hygroskopisch

## 6 Additive Fertigungsverfahren – 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



## 6 Additive Fertigungsverfahren – 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]



Additive Fertigung

# Additive Fertigung 21 – 06-05

## Photopolymerisation – II – Stereolithographie

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

