

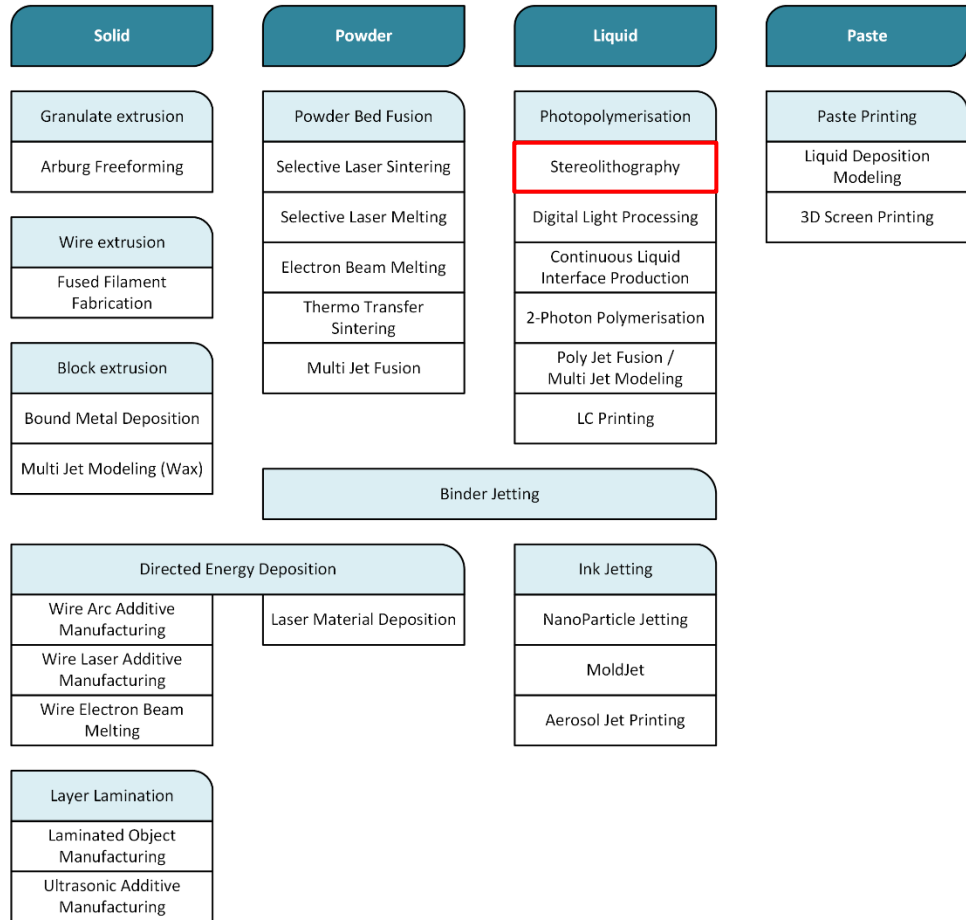
ADDITIVE FERTIGUNG – PHOTO- POLYMERISATION – II - STEREOLITHOGRAPHIE



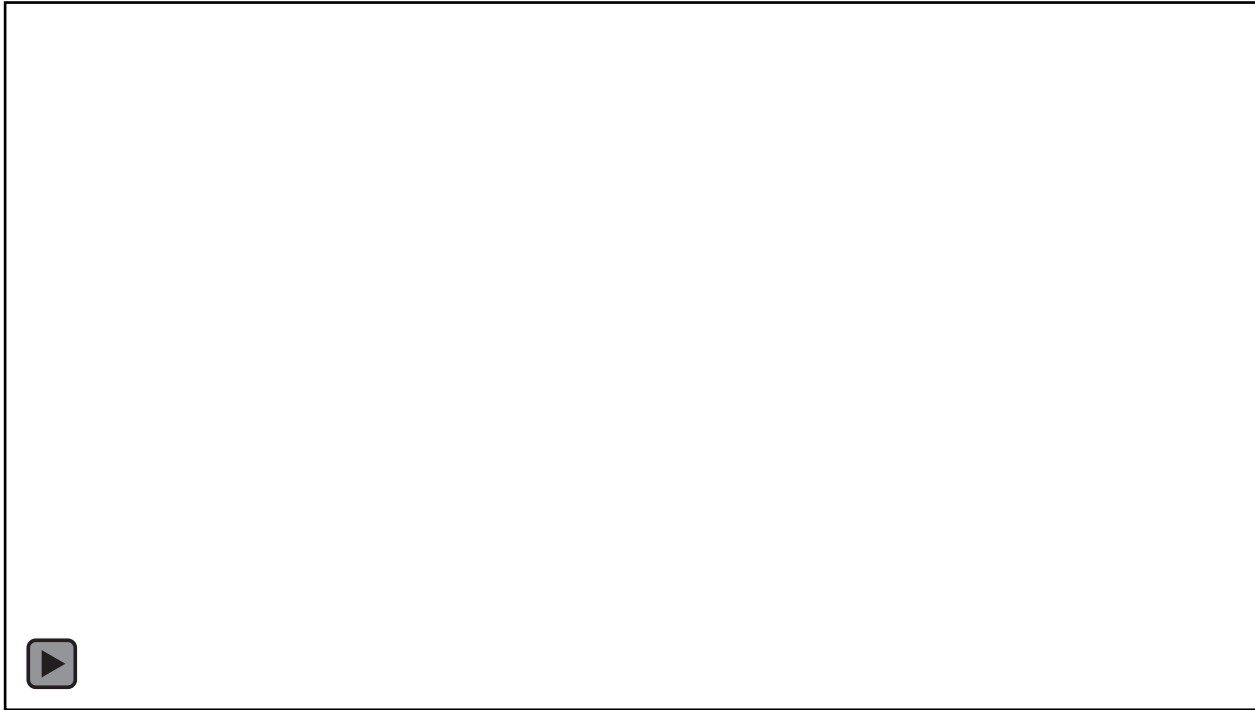
Sommersemester 2020

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

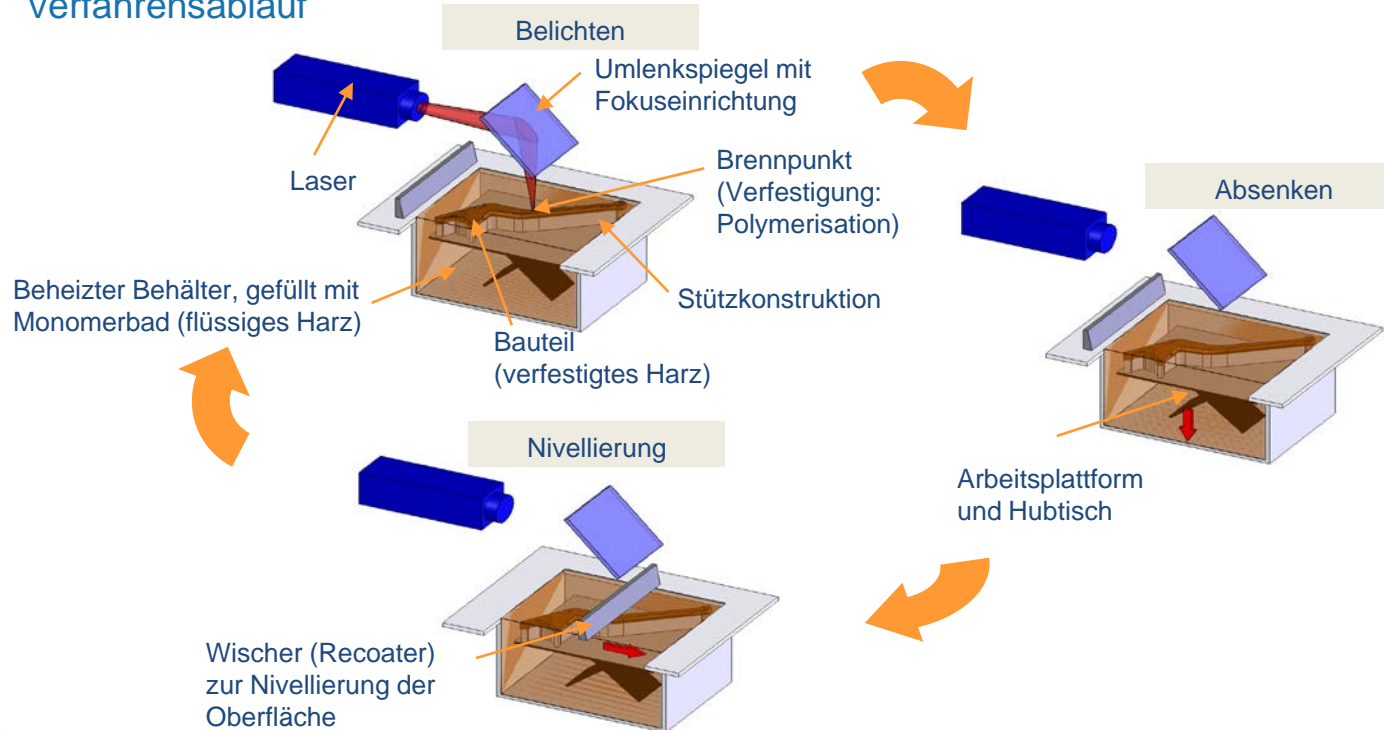
SLA: KURZBESCHREIBUNG

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

6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

SLA: KURZBESCHREIBUNG

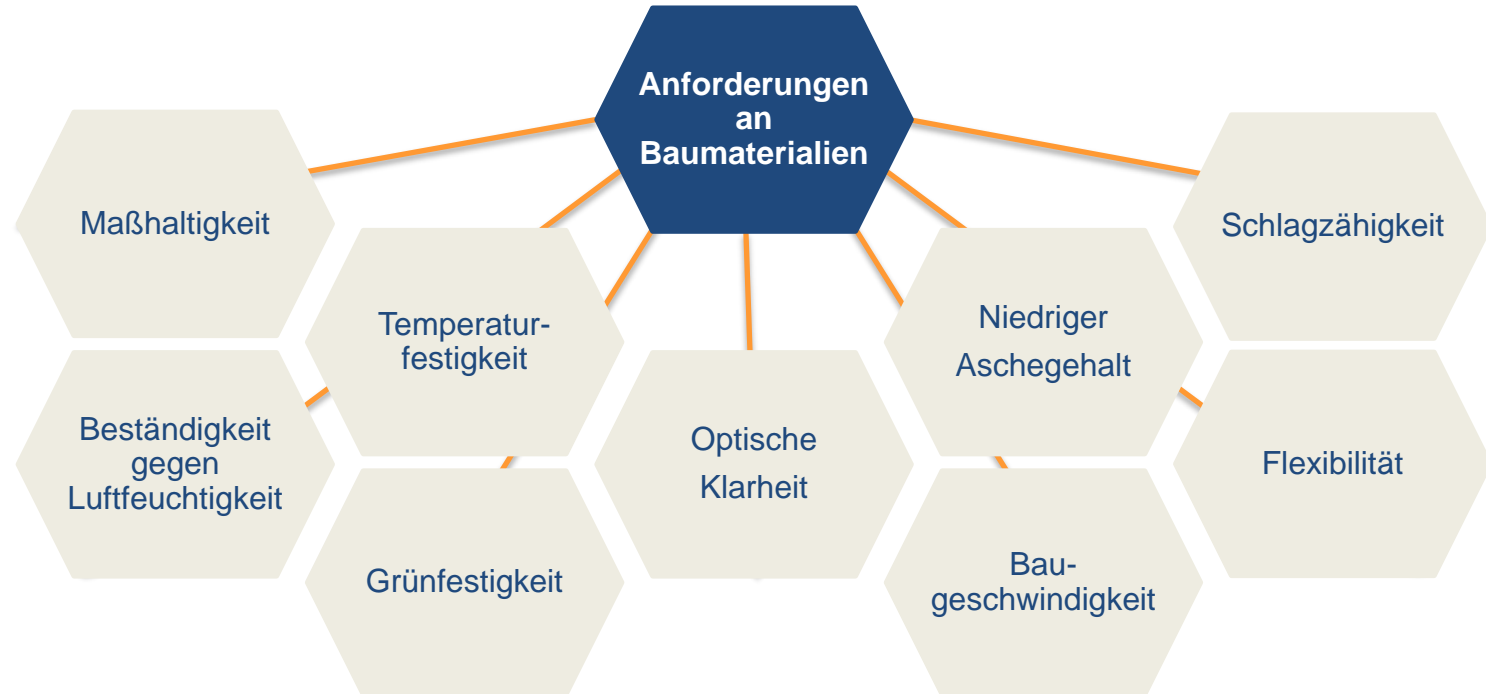
Verfahrensablauf



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



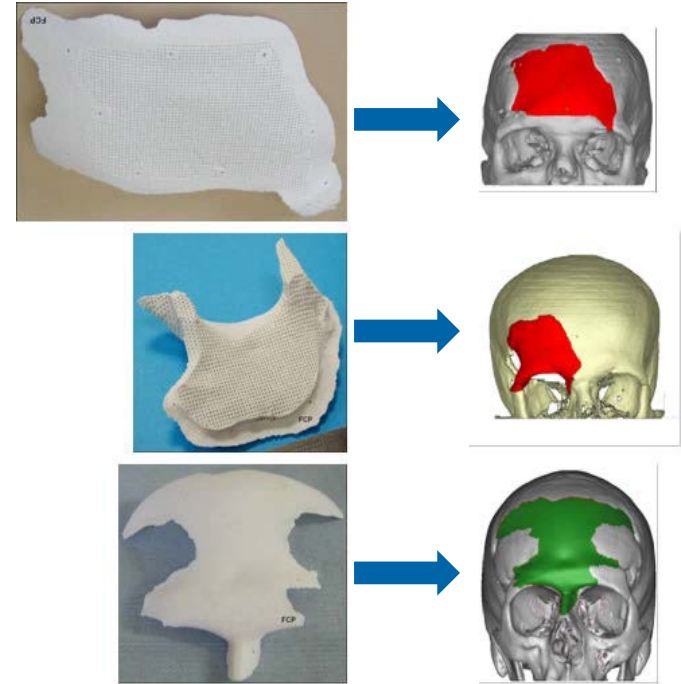
6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

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

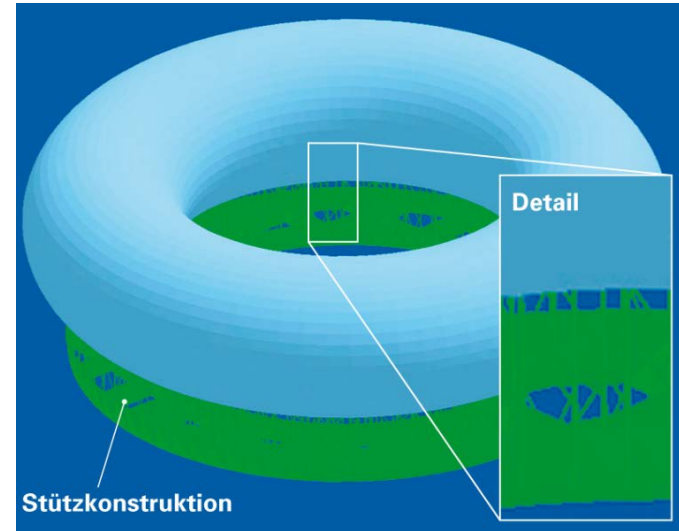
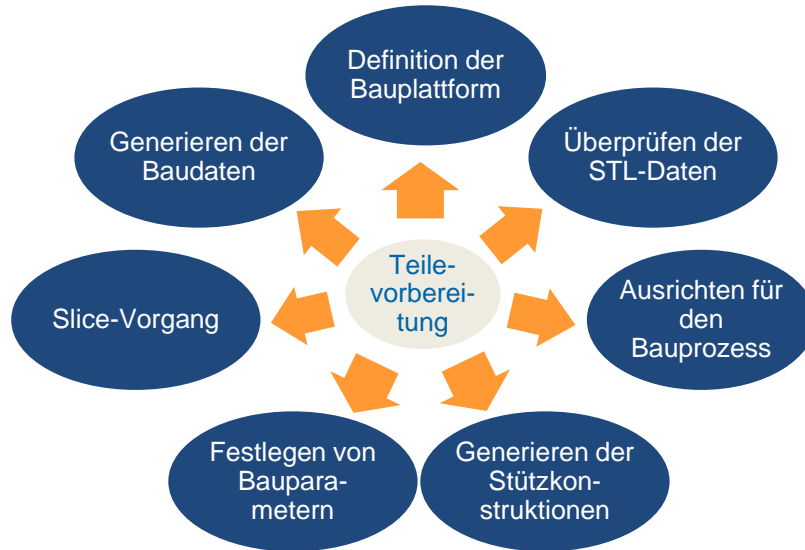


KOMMERZIELL VERFÜGBARE MATERIALIEN



	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
Polypropylene-Like Class												
Accura 25	●●●●		●●●		●●●●	White		●●●●	●●●●	●●●●		
Accura PP White (SL 7811)	●●●		●●●●		●●●●	White		●●●	●●●●	●●●		
Tough/Durable Class												
Accura Xtreme	●●●●		●●●		●●●●	Grey		●●●●	●●●●	●●●●		
Accura Xtreme White 200	●●●●				●●●●●	White		●●●	●●●●●	●●●		
ABS-Like Class												
Accura 55	●●●●		●●●		●●●	White		●●●	●●●	●●●●		
Accura ABS White (SL 7810)	●●●		●●●●		●●●●	White		●●●	●●●	●●●		
Accura ABS Black (SL 7820)	●●●		●●●●		●●●●	Black		●●●	●●●	●●●		
Clear Class												
Accura ClearVue Free (SL 7870)	●●●		●●●●	●●●●	●●●●	Clear	●●●	●●●	●●●	●●●		
Accura ClearVue	●●●		●●●●●	●●●●●	●●●●	Clear		●●●	●●●	●●●		
Accura 60	●●●●		●●●	●●●	●●●	Clear/Blue	●●●●	●●●●	●●●	●●●●●		
Casting Class												
Accura CastPro	●●●●		●●●●●			Clear Amber	●●●●●					
Accura CastPro Free (SL 7800)			●●●			Clear Amber	●●●●●					
High Temp & Composite Class												
Accura 48 HTR		●●●●	●●●			Clear Amber					●●●●	
Accura SL 5530		●●●●	●●●			Clear Amber					●●●	
Accura PEAK	●●●●	●●●●	●●●●			Translucent Amber					●●●●●	●●●●●
Accura CeraMAX	●●●●●	●●●●●	●●●●●			White						●●●●●
Accura Bluestone	●●●●●	●●●●●	●●●●●			Blue						●●●●●

VORBEREITUNGSPHASE

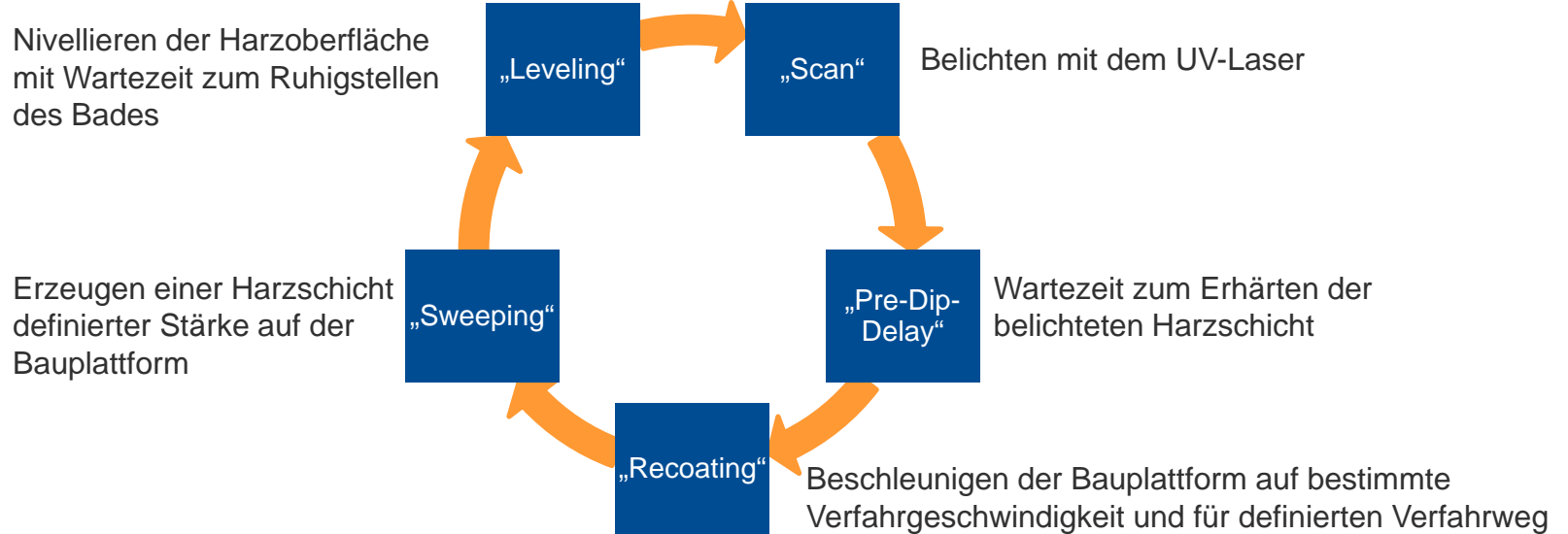


6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

BAUPROZESS



Abfolge in der Maschine



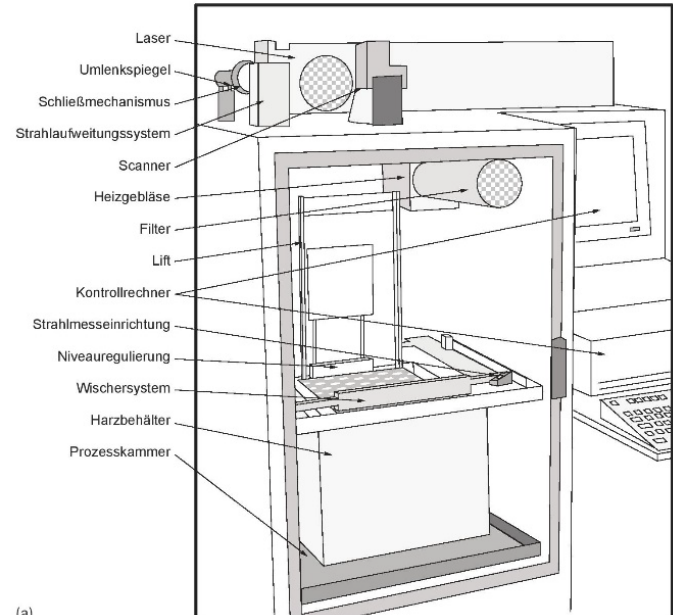
6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

BAUPROZESS



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)

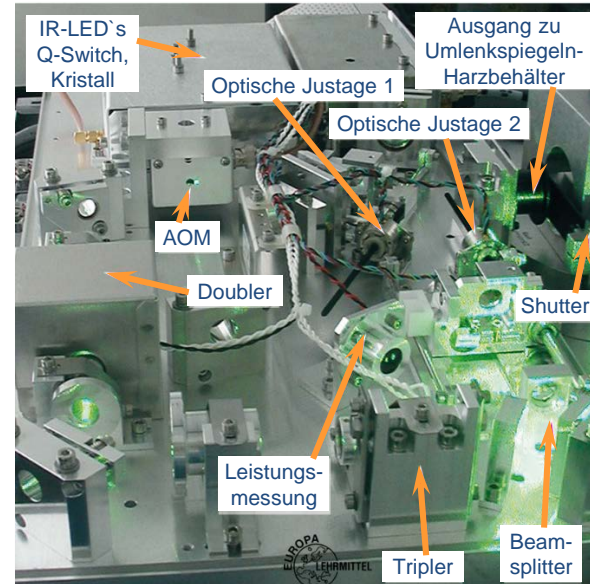
6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

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.



6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

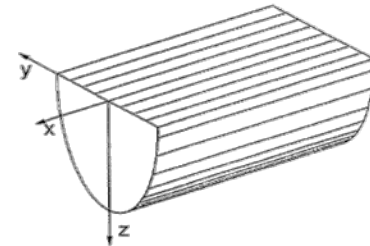
BAUPROZESS



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:

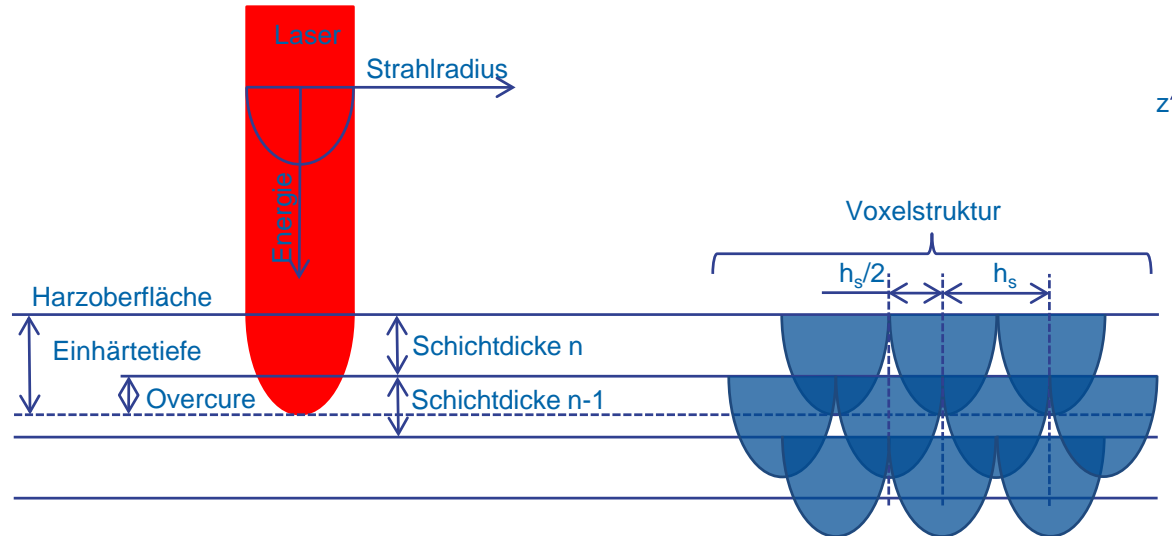


6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

BAUPROZESS



Einwirkung des Laserstrahls auf die Harzoberfläche



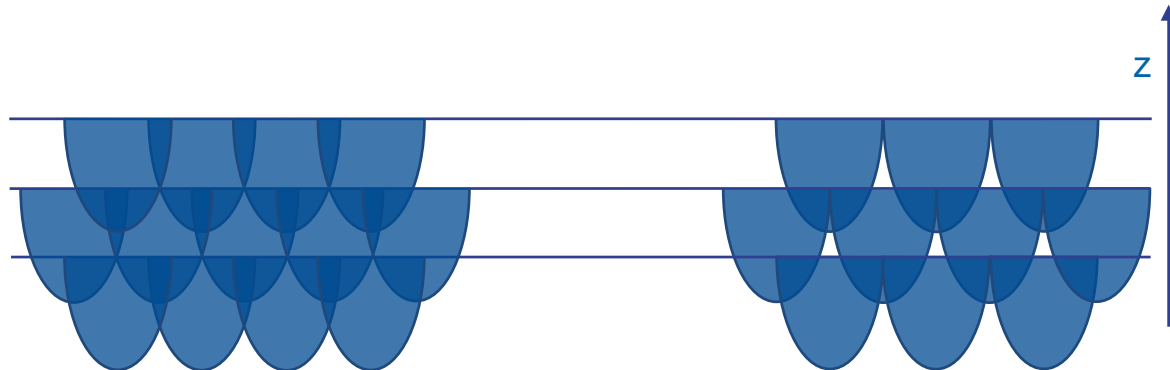
6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

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



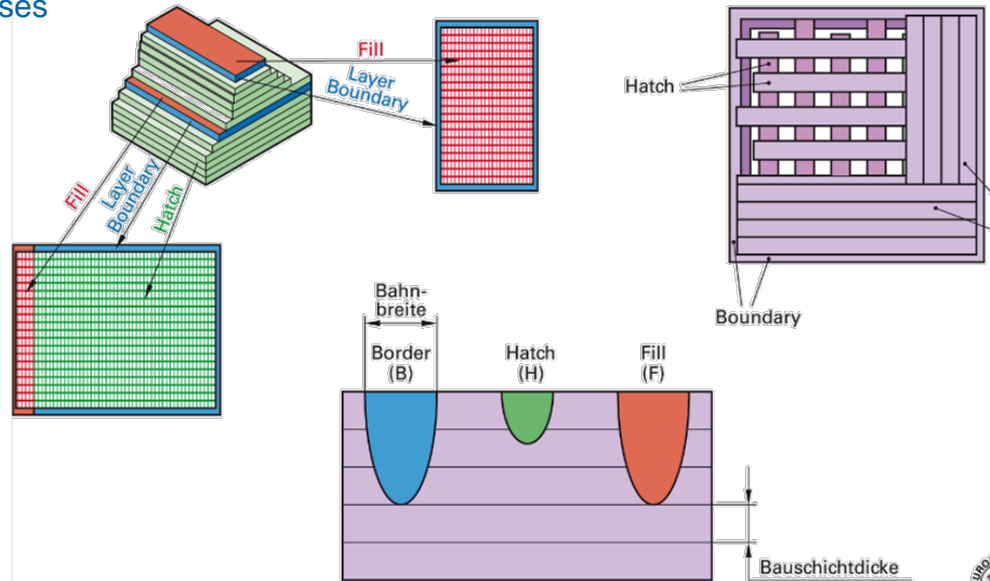
6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

BAUPROZESS



Bauparameter des Stereolithographieprozesses

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



6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

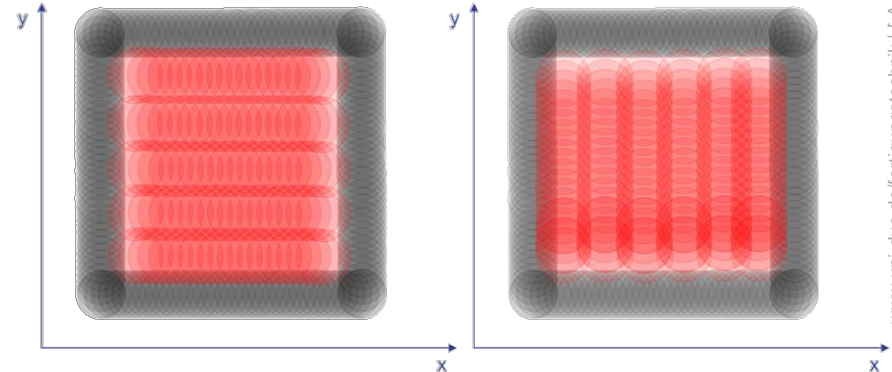
BAUPROZESS



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

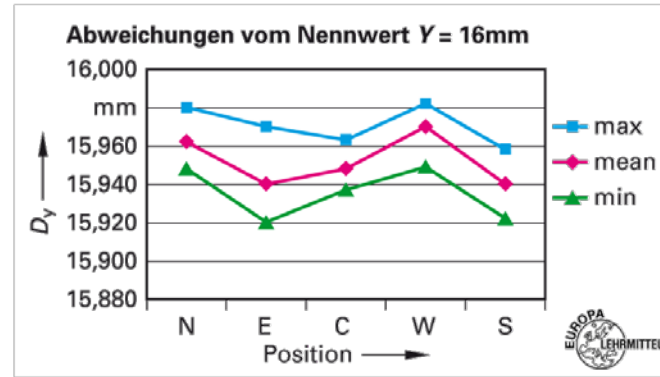
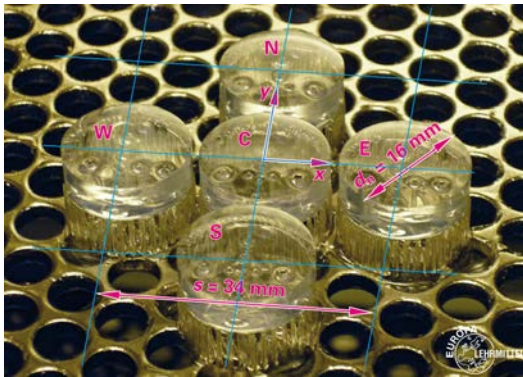
6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

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 [μm]	Welligkeit W_T [μm]
horizontale Fläche	0,125	6,4	93
	0,25	7,6	97
vertikale Fläche	0,125	3,1	11
	0,25	3,5	10

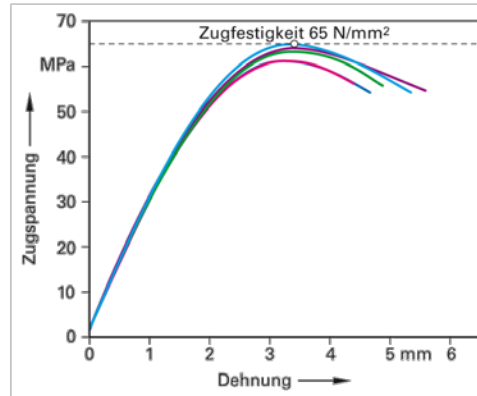
6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

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 ²
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

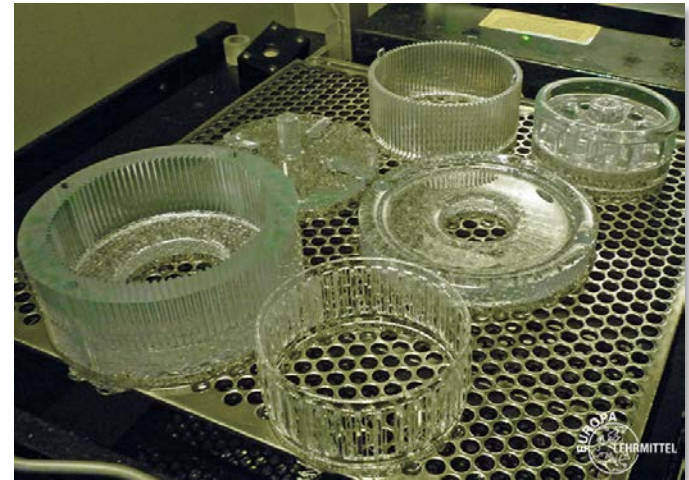
6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

NACHBEARBEITUNG



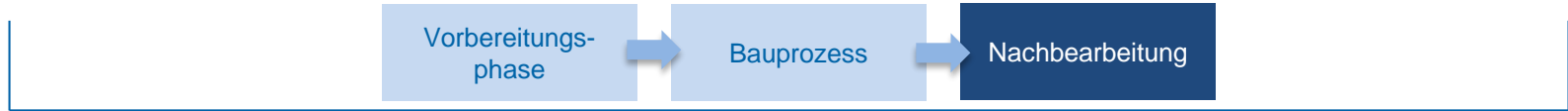
Bauteile auf ausgefahrener Bauplattform

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



6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

NACHBEARBEITUNG



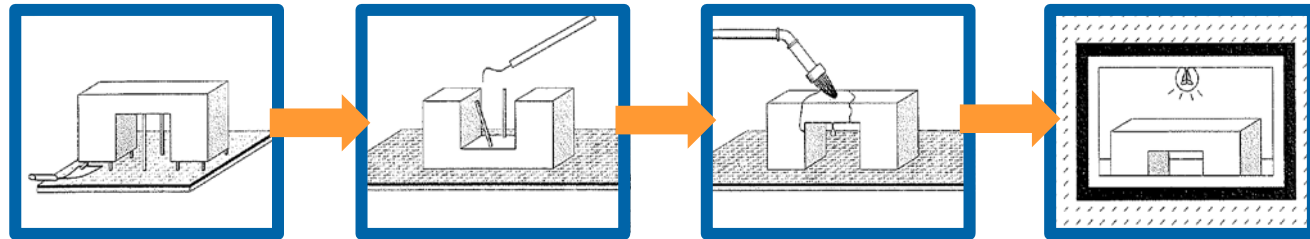
Entfernung der Stützkonstruktionen

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



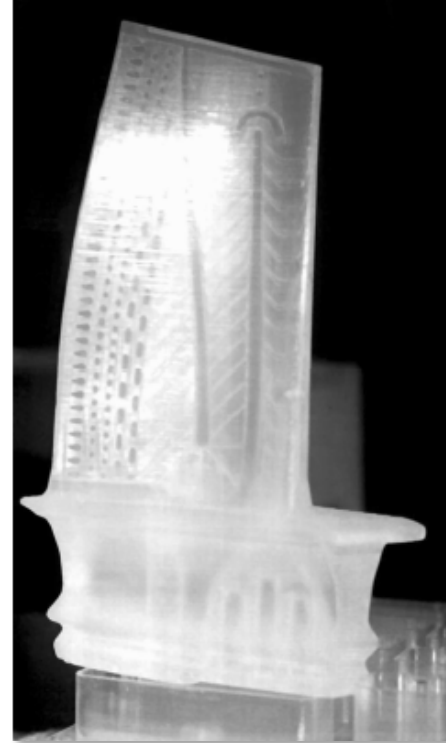
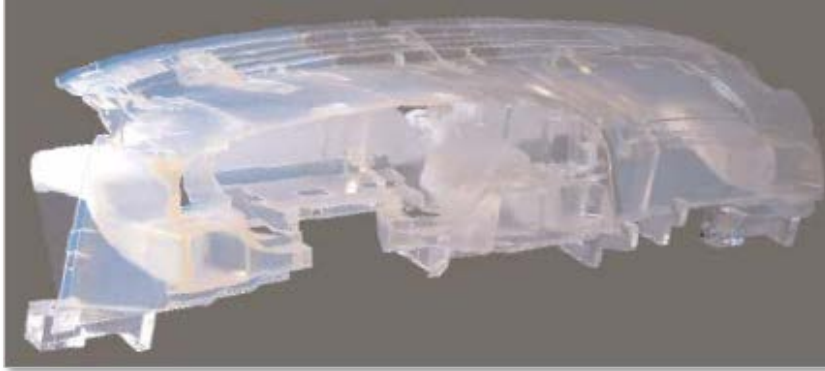
Nachvernetzung

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



6 Additive Fertigungsverfahren – Photopolymerisation

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:

- ZrO₂
- Komplexe Geometrie
- Fügen mit anderen Materialien (USB-Stick, Holz) möglich



Rosen als Zierelement für Schmuck:

- ZrO₂
- 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



[3D Systems]

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]



Additive Fertigung

Additive Fertigung 20 – 06-04

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

