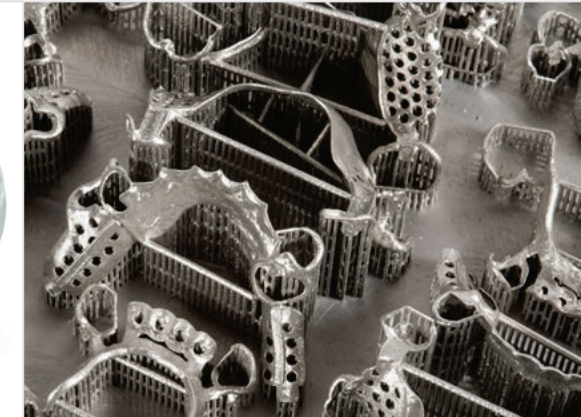
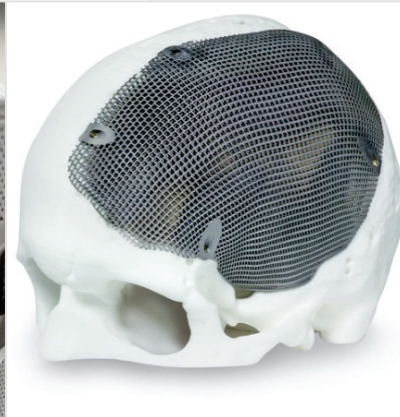
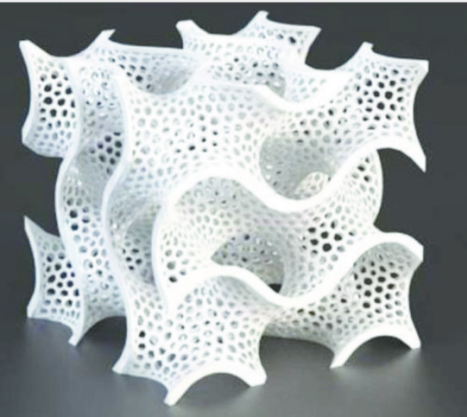


ADDITIVE FERTIGUNG – MATERIAL EXTRUSION



Sommersemester 2021

6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

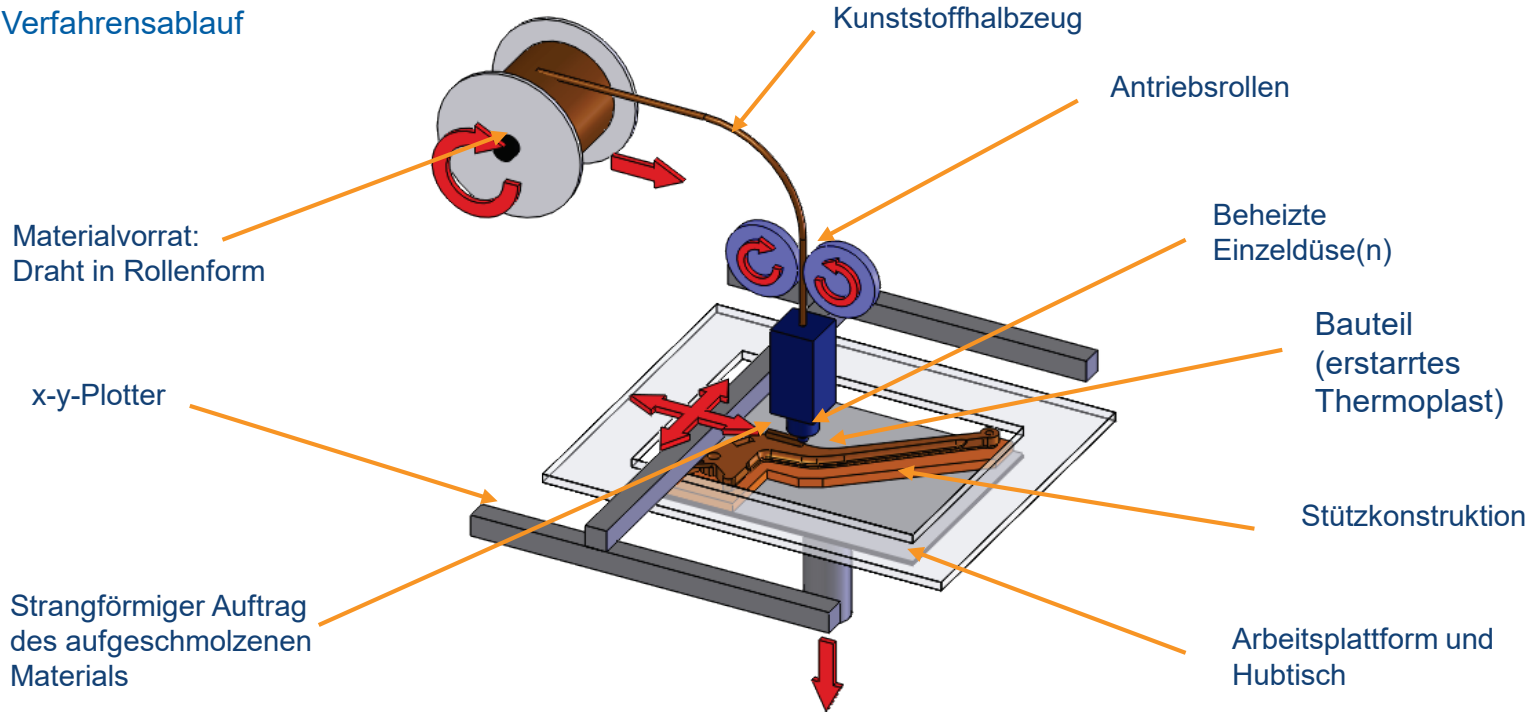
FFF/FDM: KURZBESCHREIBUNG

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

6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

FFF/FDM: KURZBESCHREIBUNG

Verfahrensablauf



FDM VIDEO



6 Additive Fertigungsverfahren – 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)



6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

MATERIAL – FDM / STRATASYS (BSP. MOJO)

Proprietäre Systeme

- Aufbewahrung erfolgt spiralförmig in Kassetten (Cartridges → Stets neuer Druckkopf → sehr teuer)
- Problemloser und einfacher Materialwechsel

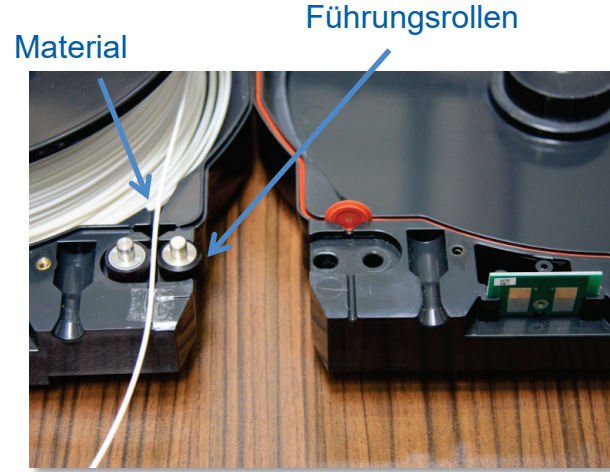
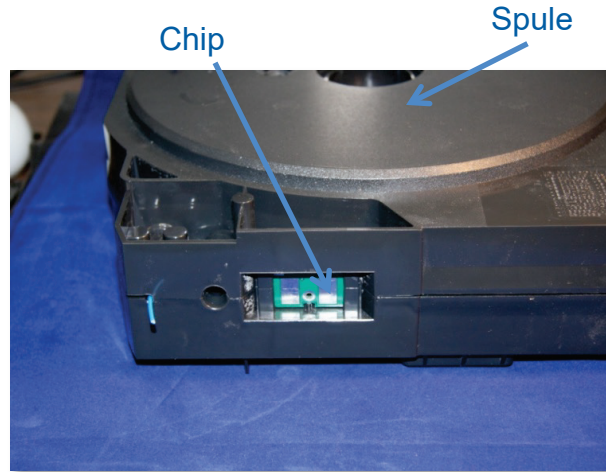


6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

MATERIAL – FDM / STRATASYS (BSP. MOJO)

Proprietäre Systeme

- Speicherung des Materialvolumens auf Chips
- Möglichkeit des Recyclings / Wiederauffüllung von Kassetten beim Hersteller



6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

MATERIAL – OPEN SOURCE

Offene Systeme / FFF

- Neben proprietären Systemen werden die meisten offenen Systeme mit einfach auf Spulen gewickeltem Filament beschickt -> preiswert
- Verschiedenste Mengen/Größen erhältlich



6 Additive Fertigungsverfahren – 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

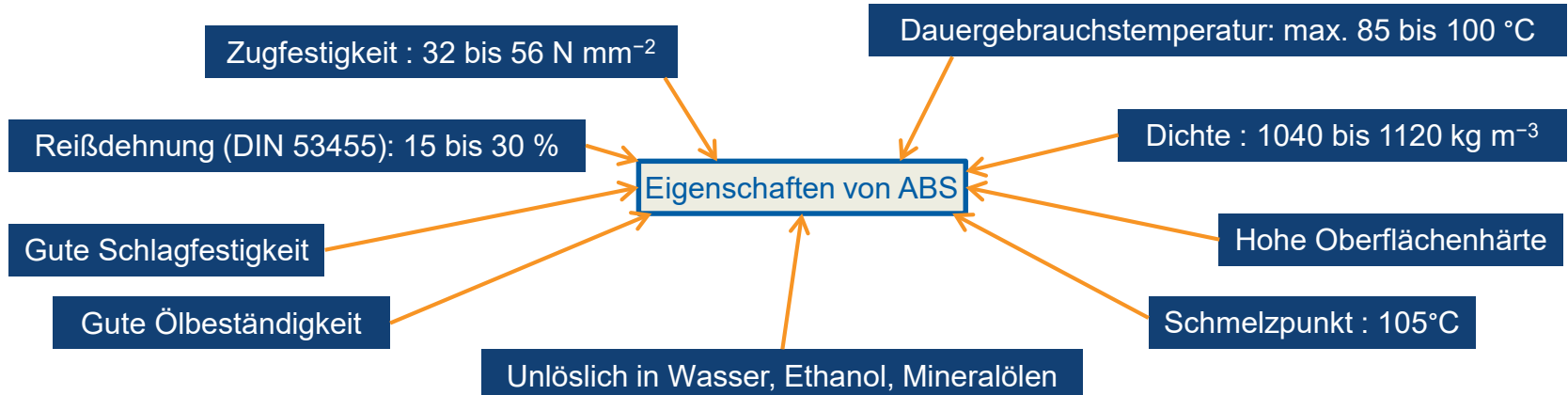
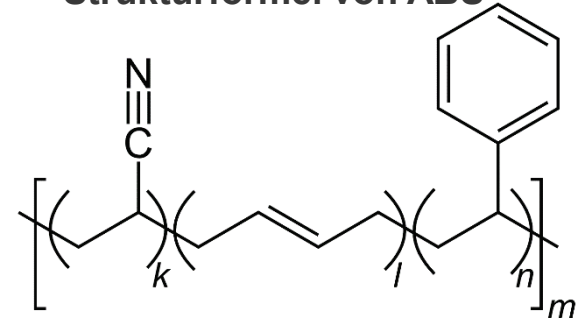
6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

MATERIAL

ABS / Acrylnitril-Butadien-Styrol:

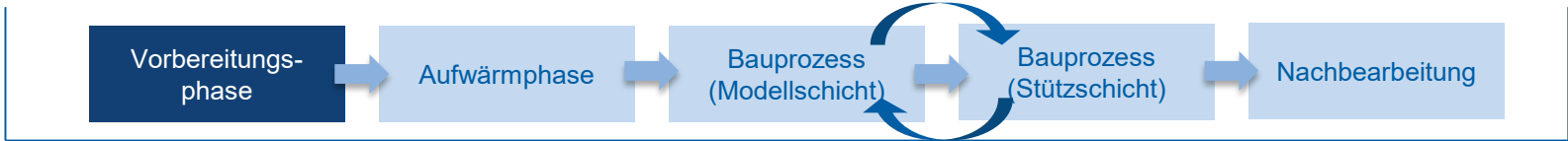
- Die chemische Zusammensetzung ist: 15-35 % Acrylnitril, 5-30 % Butadien und 40-60 % Styrol
- Es handelt sich um ein Copolymer

Strukturformel von ABS



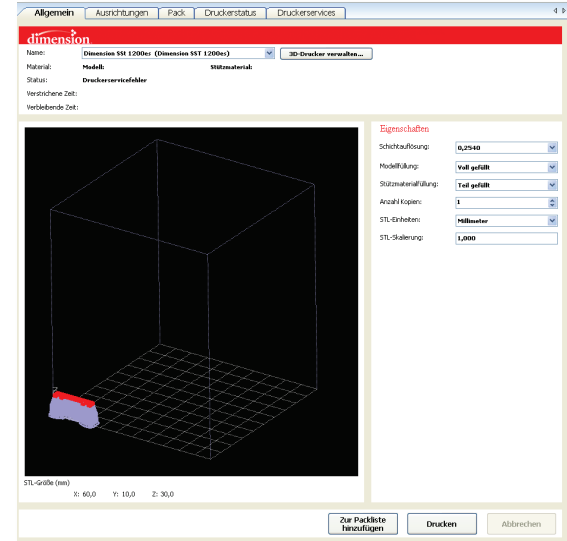
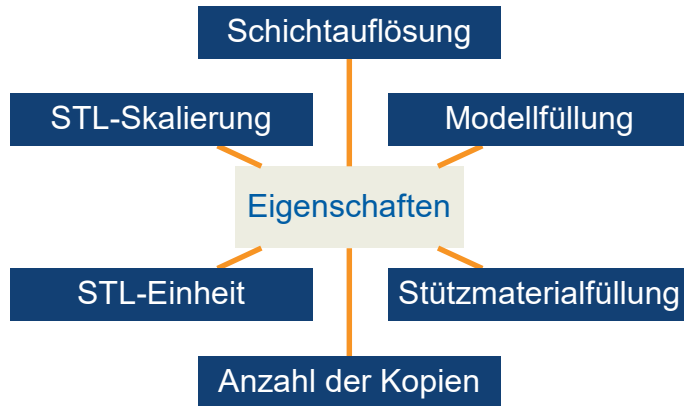
6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

VORBEREITUNGSPHASE



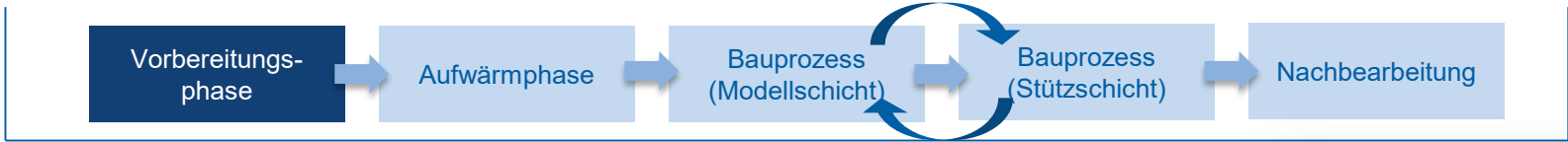
Bauprozesseinrichtung mit Hilfe der Anlagensoftware CatalystEX

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



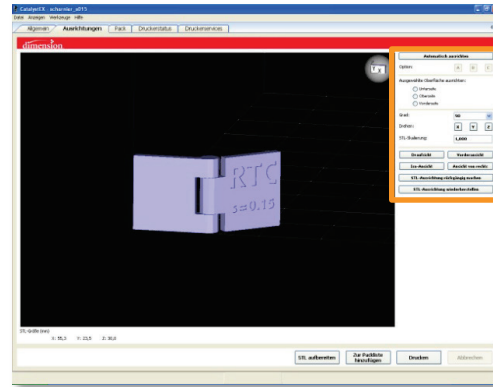
6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

VORBEREITUNGSPHASE



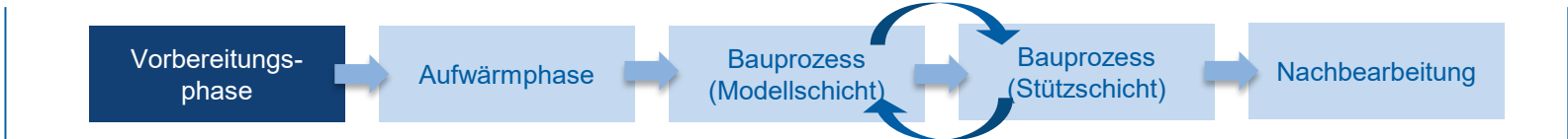
Positionierung und Orientierung der Anlagensoftware CatalystEX

- Ausrichtung und Skalierung des Bauteils
- Auswahl der Stützkonstruktionen an die Anforderungen des Bauteils anpassen
- Mittels der Software ist eine Überprüfung jeder einzelnen Schicht möglich
- Spurbreiten und Werkzeugbahnen können eingeblendet werden und zur Überprüfung bei beweglichen Bauteilen herangezogen werden



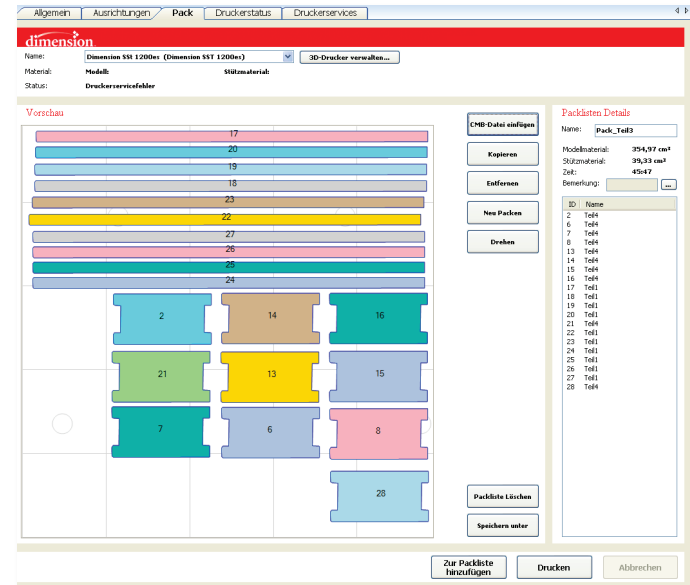
6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

VORBEREITUNGSPHASE



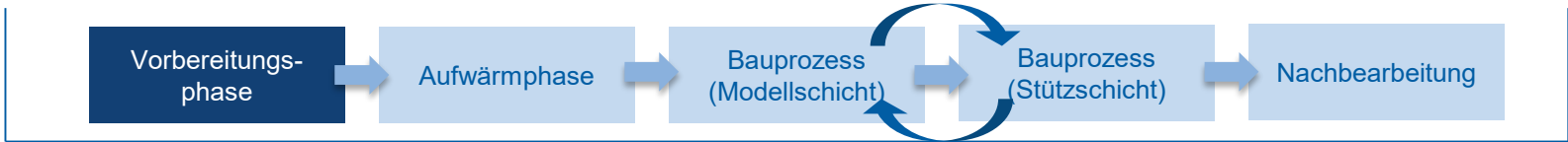
Packliste

- Software zerlegt (Slicen) die STL-Datei in mehrere Schichten
- Berechnung der Werkzeugbahnen und Übertragung der Daten zu der Anlage
- Zusammenfassung allgemeiner Informationen
- Angaben zum Bedarf des Modell- und Stützmaterials
- Bauzeitberechnung



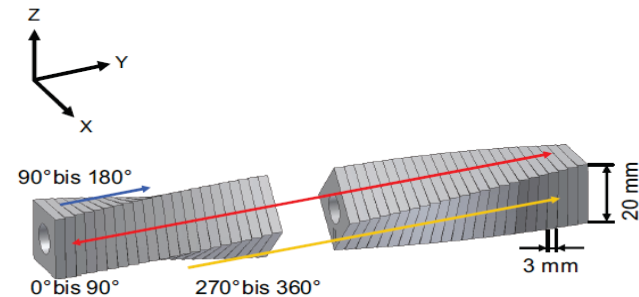
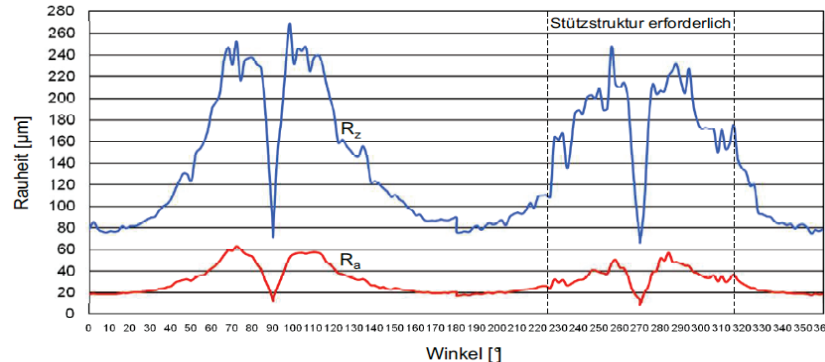
6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

VORBEREITUNGSPHASE



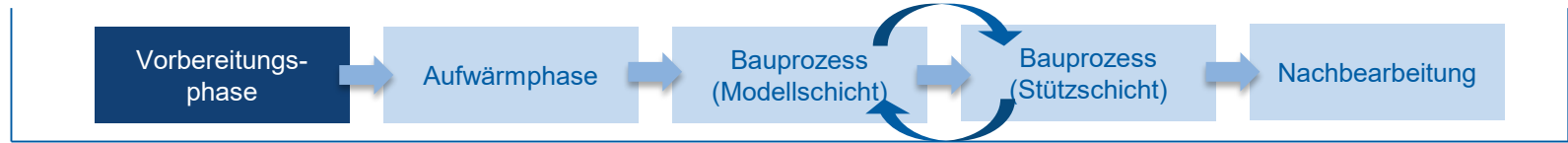
Stützkonstruktionen

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



6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

VORBEREITUNGSPHASE



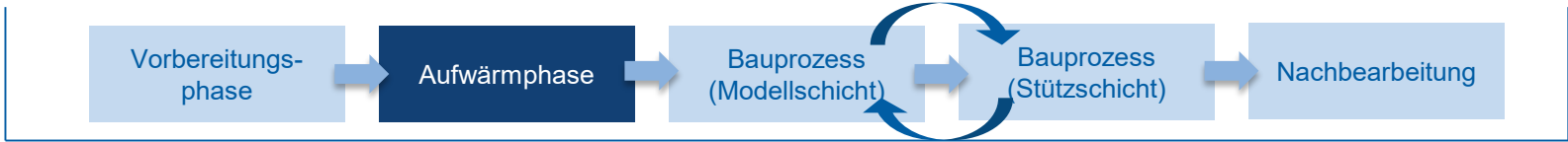
Stützkonstruktionen

- Stützkonstruktionen haben einen hohen Einfluss auf die Bauzeit
- Auswahl von Stützkonstruktionen hat Einfluss auf die Qualität des Ergebnisses
- Stützkonstruktionen führen grundsätzlich an der Bauteilflächen zu schlechteren Oberflächen



6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

AUFWÄRMPHASE

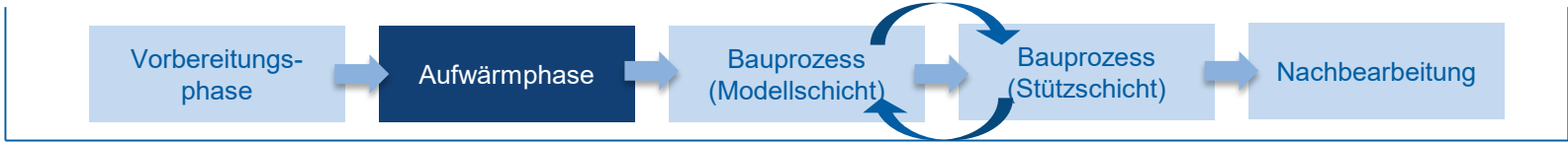


Einrichtung des Anlagensystems

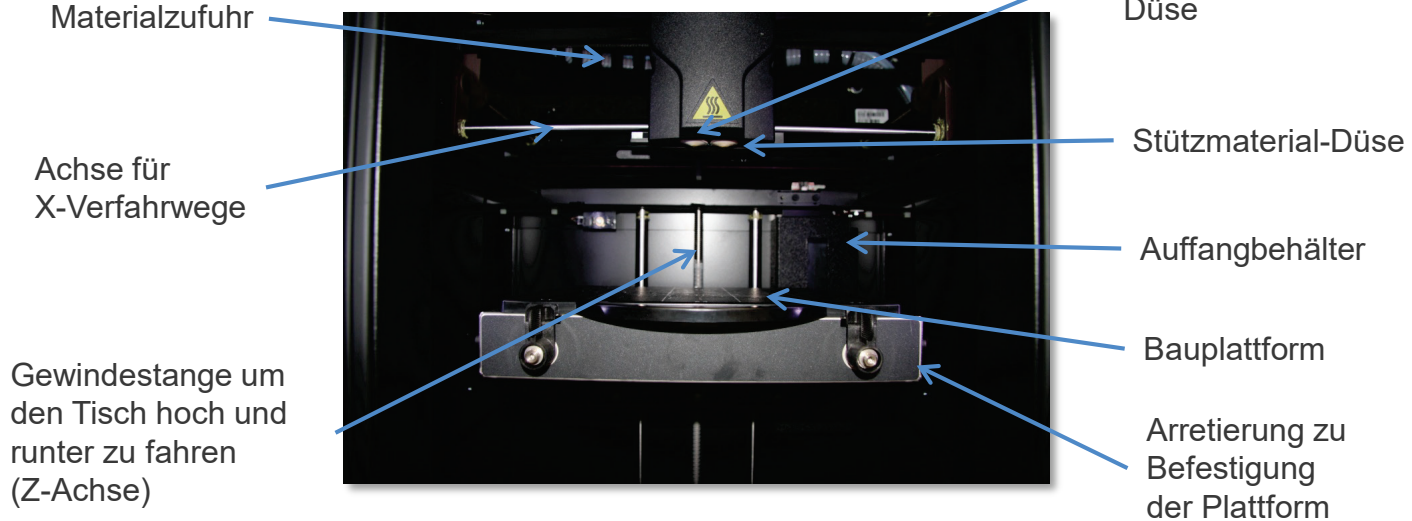


6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

AUFWÄRMPHASE

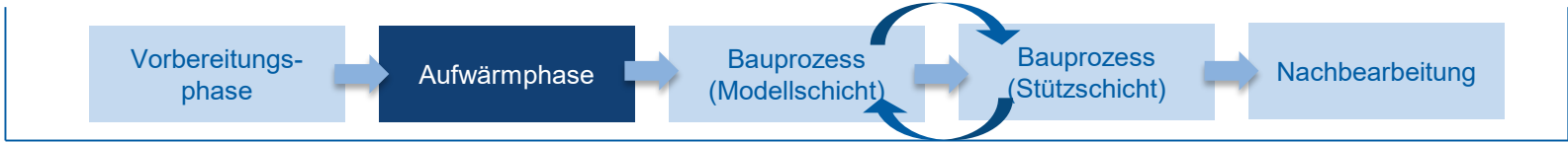


Einrichtung des Anlagensystems

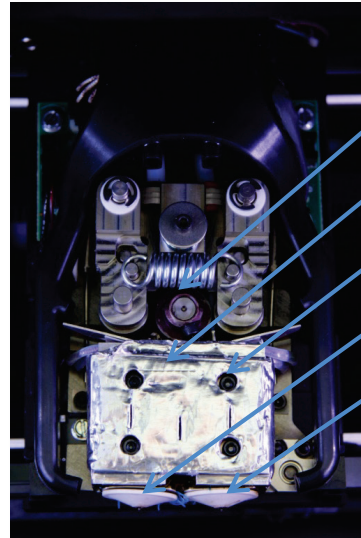
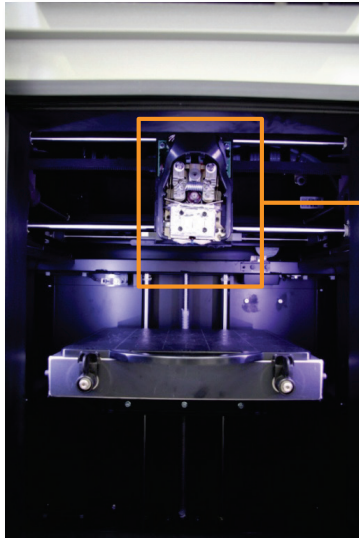


6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

AUFWÄRMPHASE



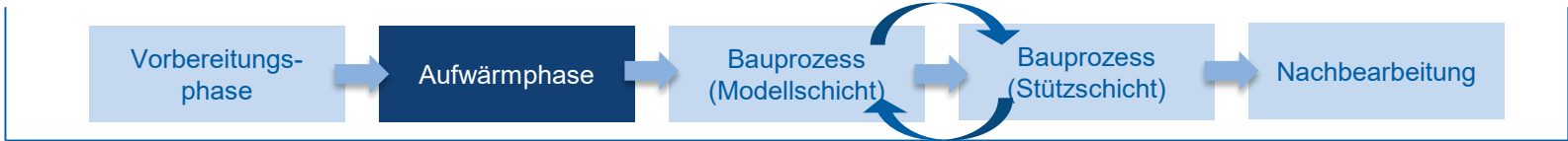
Einrichtung des Anlagensystems



- Antriebsrolle
- Abdeckung
- Halteschrauben
- Modelldüse
- Stützmaterialdüse

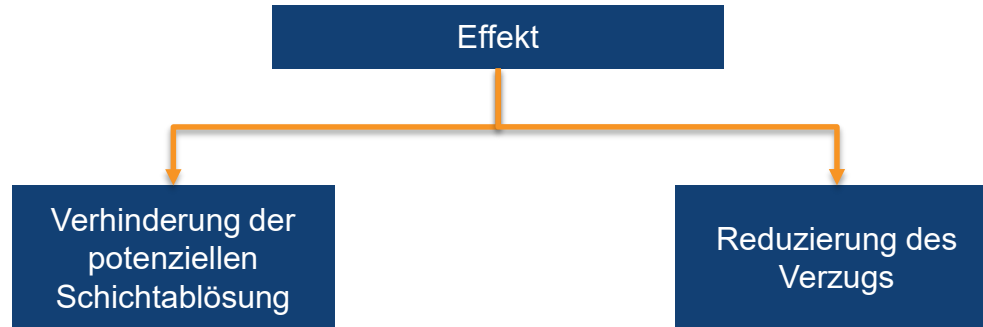
6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

AUFWÄRMPHASE



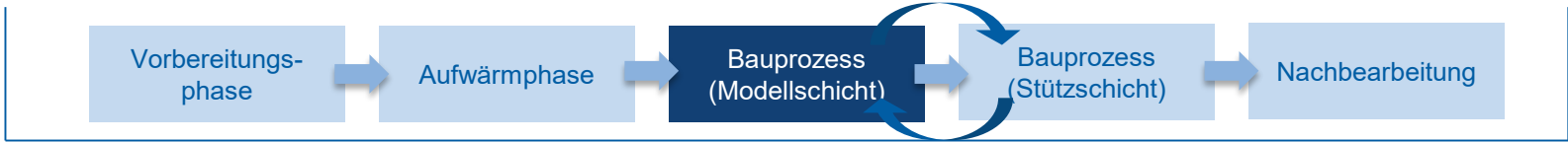
Aufheizen des Anlagensystems

- Aufheizen der Anlage/Bauraum auf ca. 80°C
- Aufheizen der Düsen auf ca. 270°C

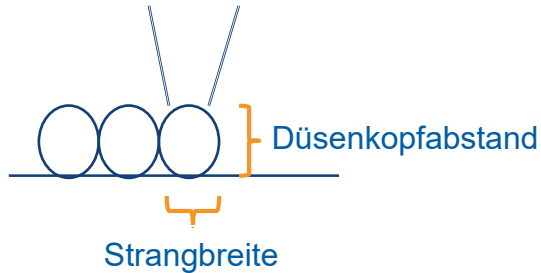


6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

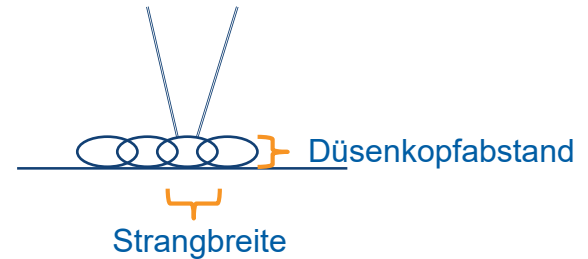
BAUPROZESS



- 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



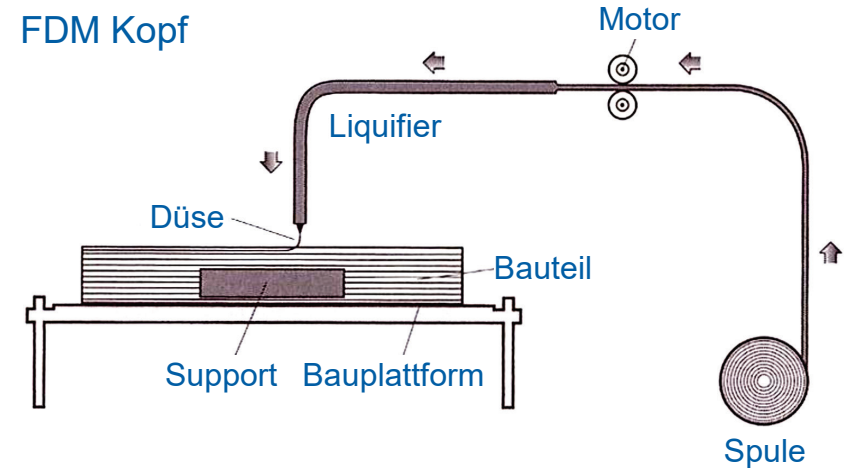
Richtig

6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

BAUPROZESS

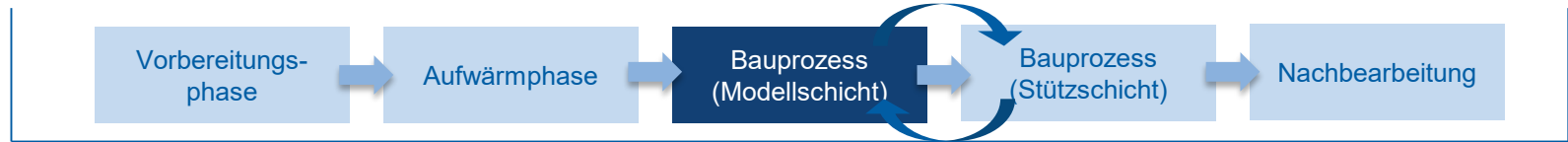


- Material (Thermoplast) wird geschmolzen und extrudiert
- Schichtstärken zwischen 0,1 mm – 0,4 mm
- Modell- und Stützmaterialdüse bewegen sich gemeinsam, werden aber separat und nacheinander angesteuert
- Hohe Prozessstabilität und Prozesssicherheit auf Kosten der Bauzeit
- Durch günstige Positionierung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

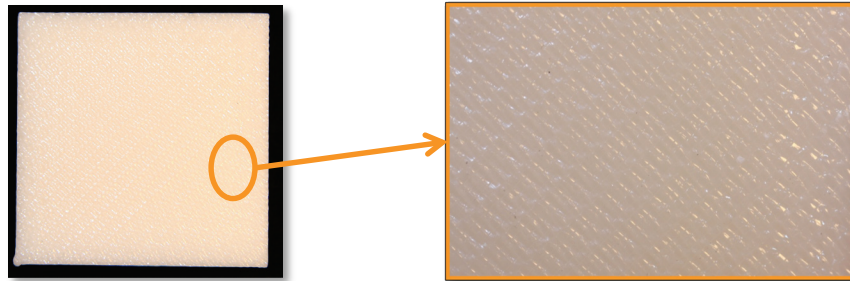


6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

BAUPROZESS



Innere Bereiche: Variante 1: vollgefüllt



Vorteile:

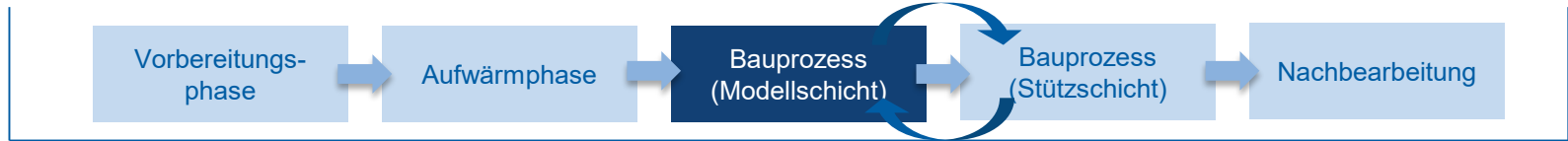
- ⊕ Sehr hohe Stabilität
- ⊕ Geringer Verzug

Nachteile:

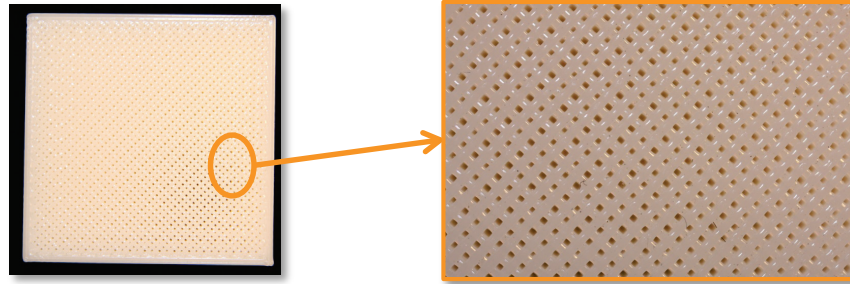
- ⊖ Hohe Bauzeit
- ⊖ Höheres Gewicht
- ⊖ Hoher Materialverbrauch

6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

BAUPROZESS



Innerer Bereich: Variante 2: Sparse – hohe Dichte



Vorteile:

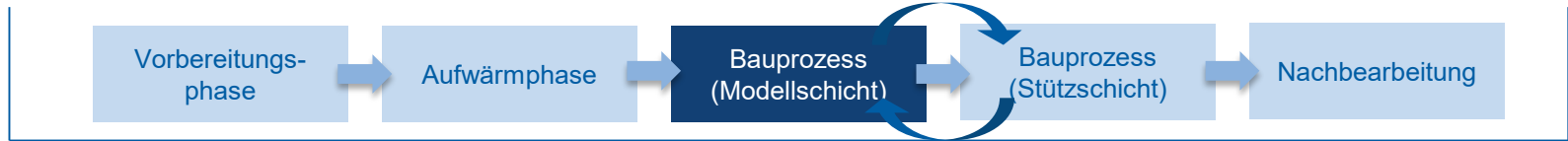
- + Hohe Stabilität
- + Weniger Gewicht und Materialverbrauch
- + Etwas kürzere Bauzeit

Nachteile:

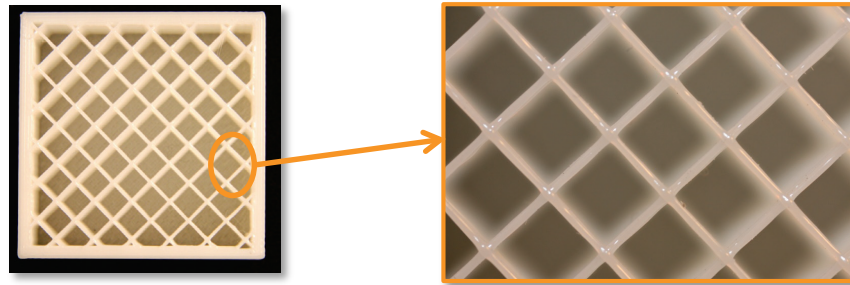
- Etwas Verzug
- Mechanische Bauteileigenschaften unterscheiden sich vom vollen Bauteil

6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

BAUPROZESS



Innerer Bereich: Variante 3: Sparse – niedrige Dichte



Vorteile:

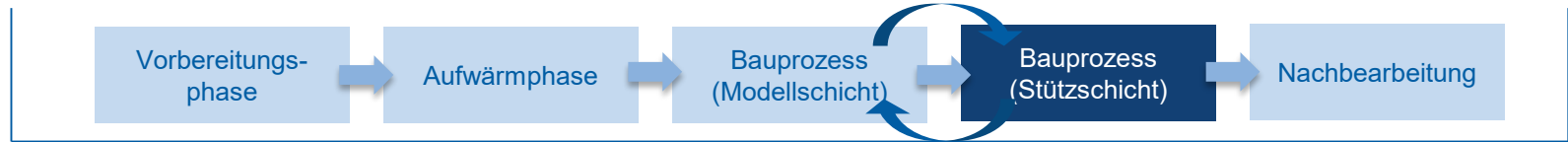
- + Sehr geringes Gewicht
- + Sehr geringe Bauzeit
- + Geringer Materialverbrauch

Nachteile:

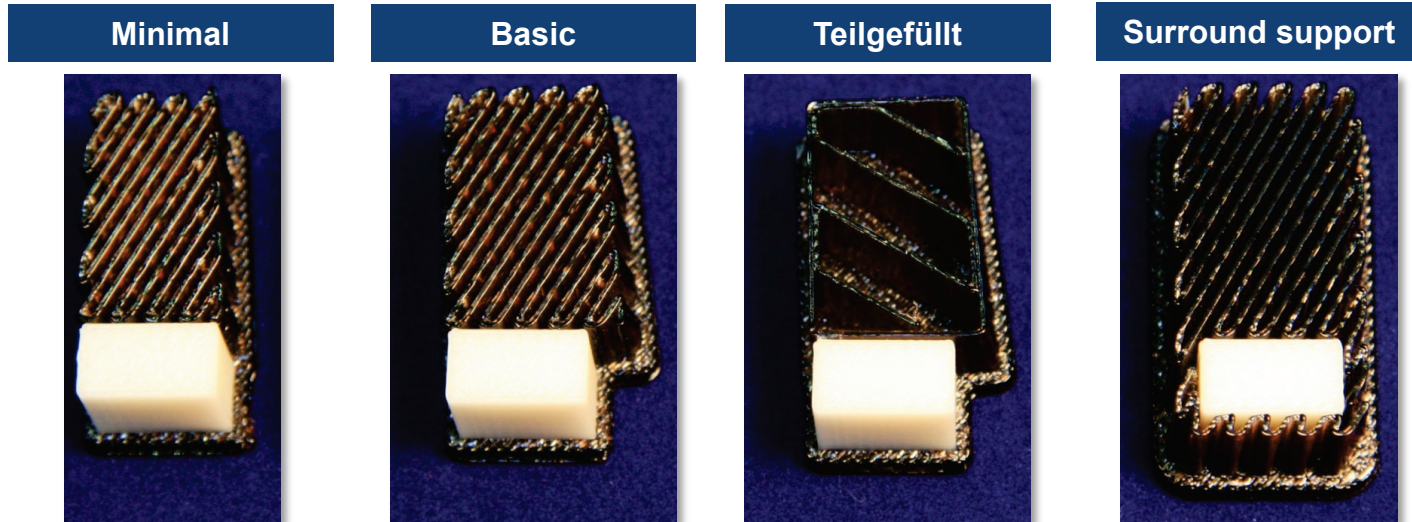
- Hoher Verzug
- Niedrige Stabilität
- Mögliches „Einfallen“ der Oberflächen

6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

BAUPROZESS

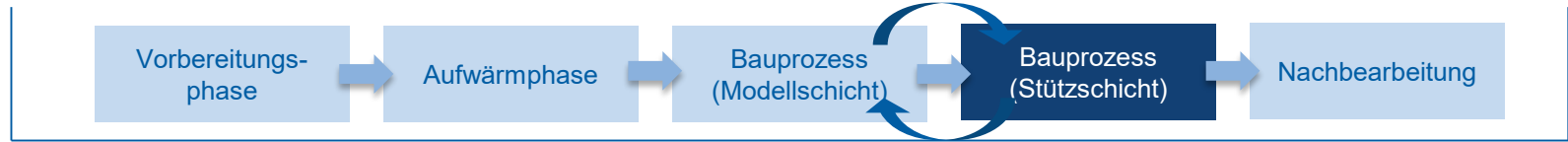


Auswahl geeigneter Stützkonstruktionen

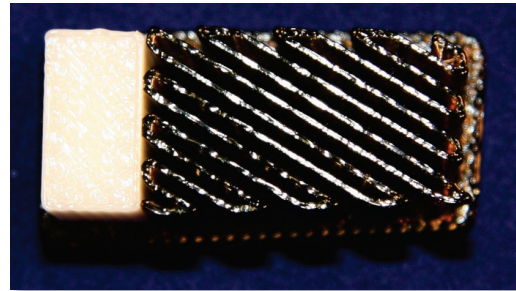


6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

BAUPROZESS



„Minimale“ Stützkonstruktionen



Vorteile:

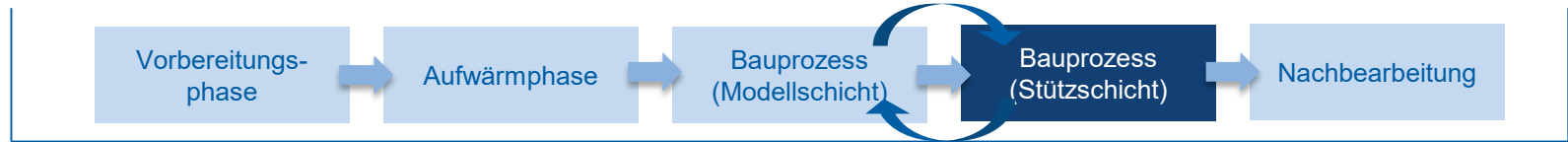
- Schnelle Stützbauzeit
- Weniger Stützmaterialentfernung
- Schnellerer Postprozess

Nachteile:

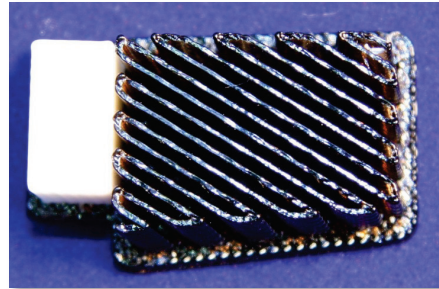
- ➖ Stützkonstruktionen werden auf ein Minimum reduziert – ggf. „Überhängen“ der Schicht
- ➖ Sollte nicht bei Schriften benutzt werden

6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

BAUPROZESS



„Basic“ Stützkonstruktionen



Vorteile:

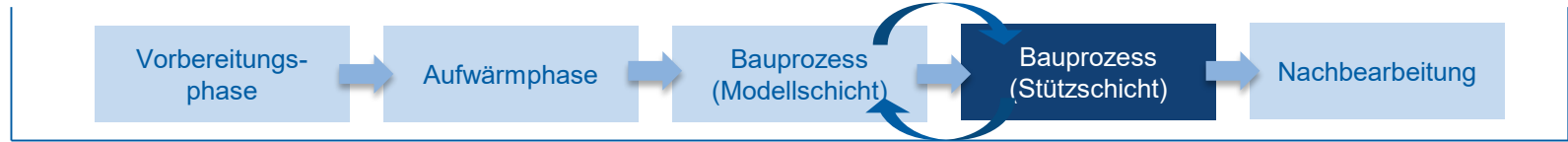
- ⊕ Hohe Stützstabilität
- ⊕ Bei feinen Strukturen anwendbar

Nachteile:

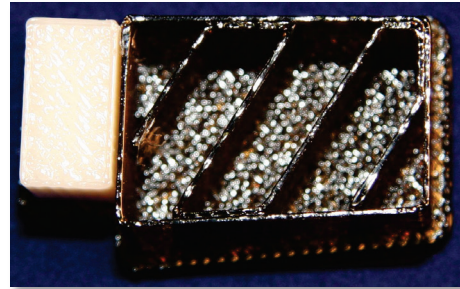
- ⊖ Größere Stützbaupzeit
- ⊖ Längerer Postprozess

6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

BAUPROZESS



„Teilgefüllt“ Stützkonstruktionen



Vorteile:

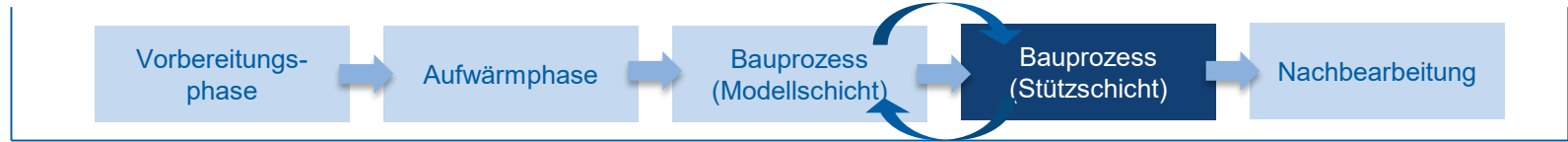
- + Sehr schnelle Stützbauzeit
- + Weniger Stützmaterialentfernung
- + Schnellerer Postprozess
- + Leichte Entfernung des Stützmaterials

Nachteile:

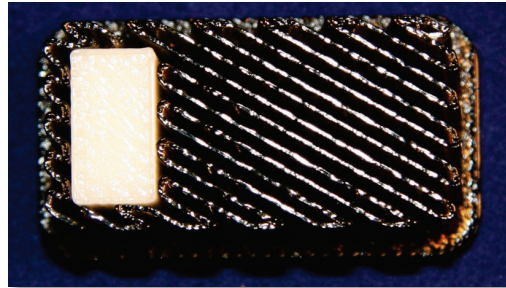
- Mittlere Stabilität für das Modellmaterial
(nicht geeignet für sehr filigrane Strukturen)

6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

BAUPROZESS



„Surround support“ Stützkonstruktionen



Vorteile:

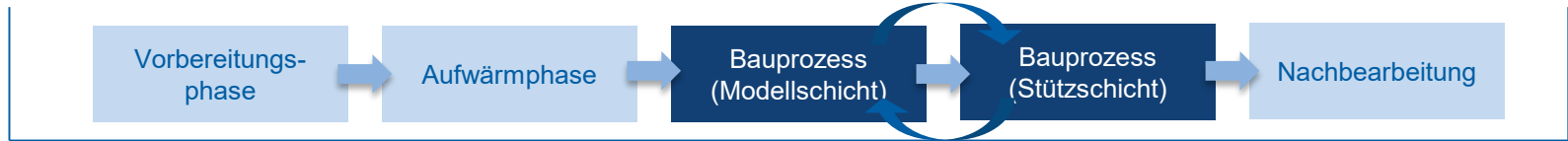
- + Sehr hohe Stützstabilität
- + Feinste Strukturen können gestützt werden
- + Bauteile werden komplett mit Stützmaterial umhüllt

Nachteile:

- Sehr hohe Stützbauzeit
- Viel Materialentfernung -> „verlorenes Material“
- Langer Postprozess
- Teuer

6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

BAUPROZESS



Einfluss der Modell- und Stützmaterialfüllung

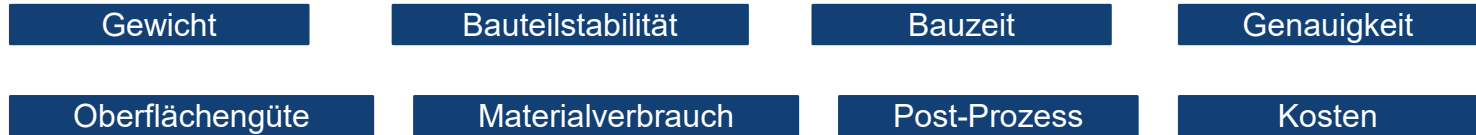
Modellfüllung

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

Stützmaterial

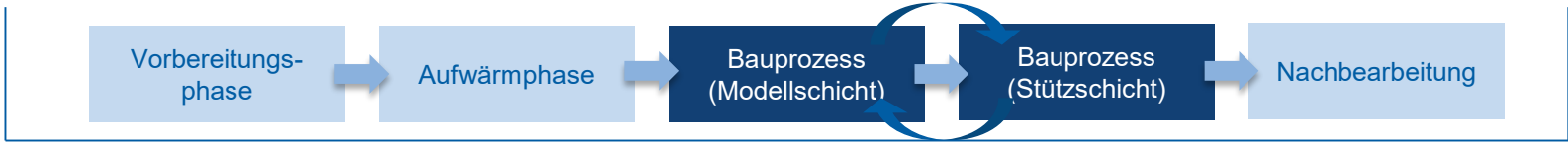
- Minimal
- Basic
- Teilgefüllt
- Surround support

Einfluss auf



6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

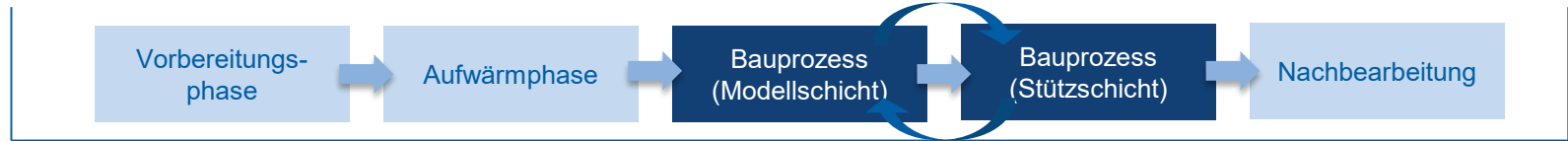
BAUPROZESS



<https://www.youtube.com/watch?v=HVdYKtIHtSO>

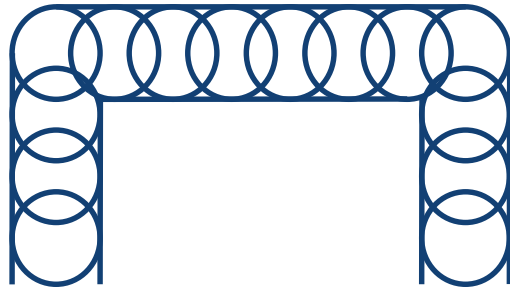
6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

BAUPROZESS



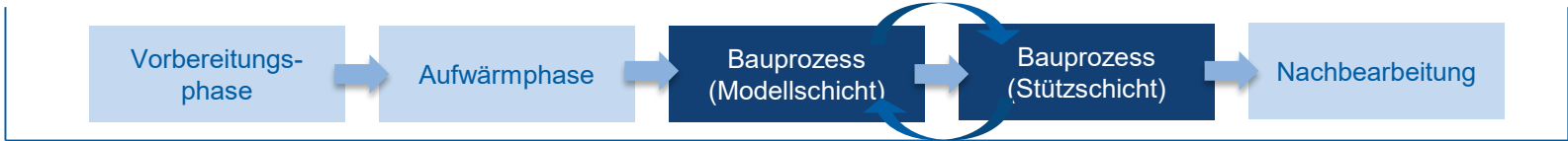
Bauteilgenauigkeit

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



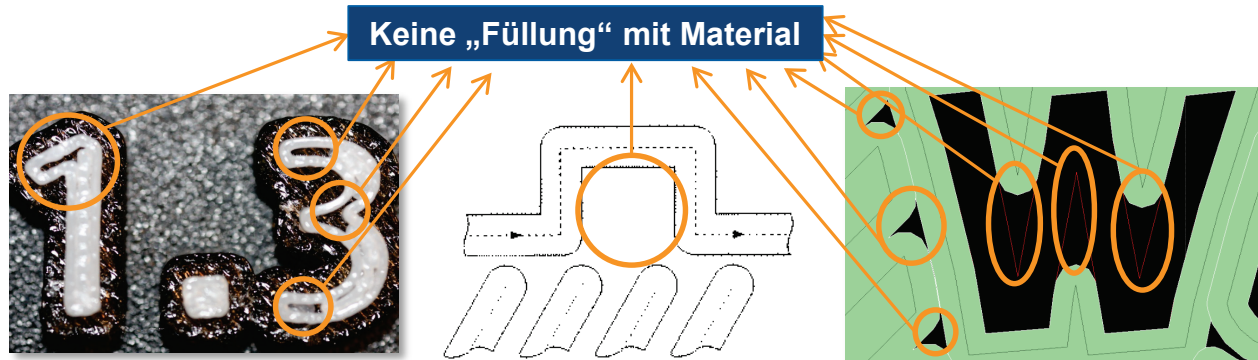
6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

BAUPROZESS



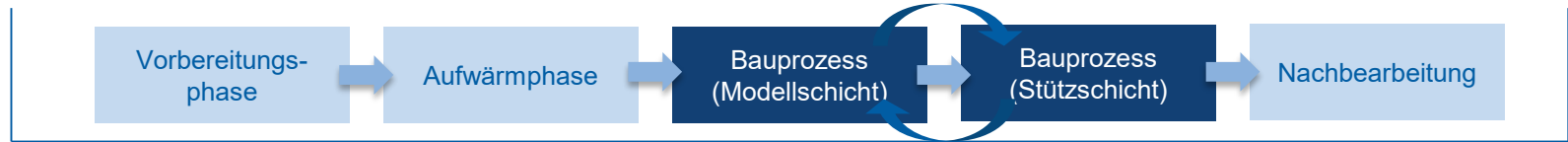
Lücken / GAP

- Die Bildung von Materiallücken zwischen zwei Spuren wird als „Gap“ bezeichnet.
- Es kann jedoch vorher in der Software manuell auf Gaps geprüft werden.
- Treten solche Gaps auf, muss die zu fertigende Struktur in der Konstruktion verändert und angepasst werden.



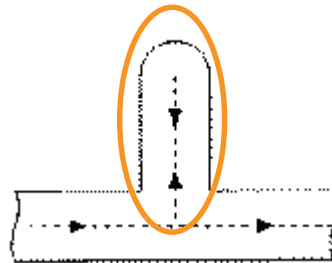
6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

BAUPROZESS



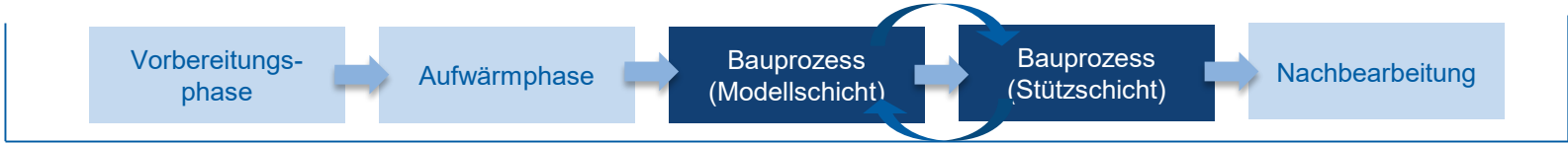
GAP

- Den Grenzfall bildet eine Wand, die außerhalb des Bauteils endet und die gerade eine Spurbreite dick ist.
- Hier würde die Ideallinie in der Mitte gerade zwei Mal auf dem Hin- und Rückweg überfahren, was zu einer unsauberen Oberfläche führt.



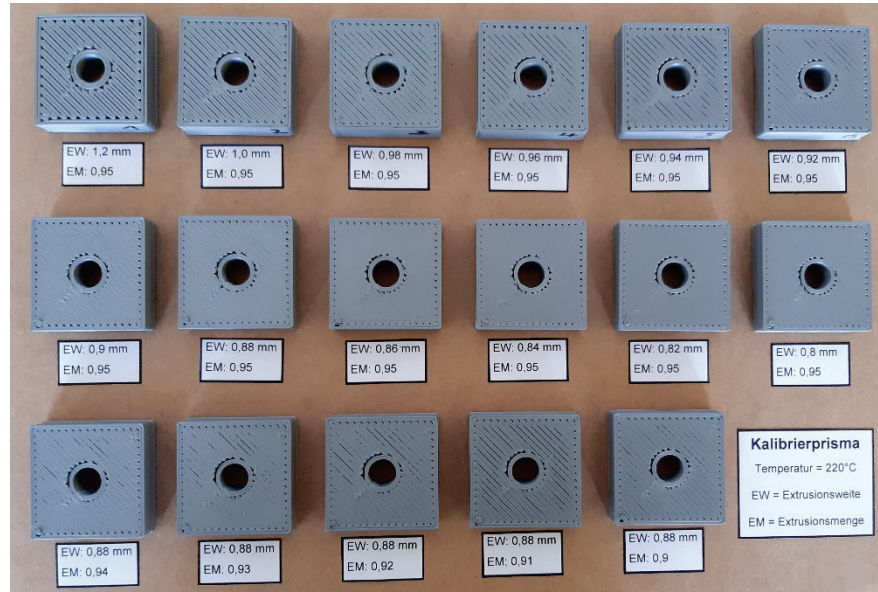
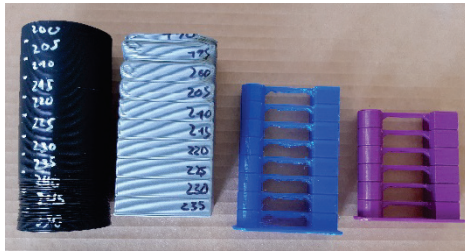
6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

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)



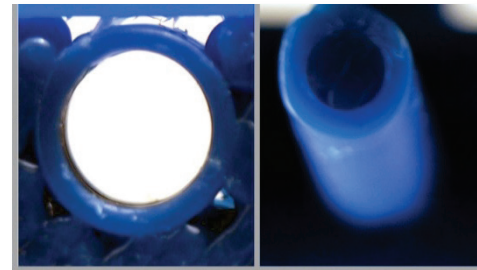
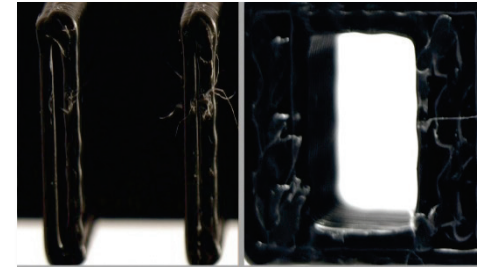
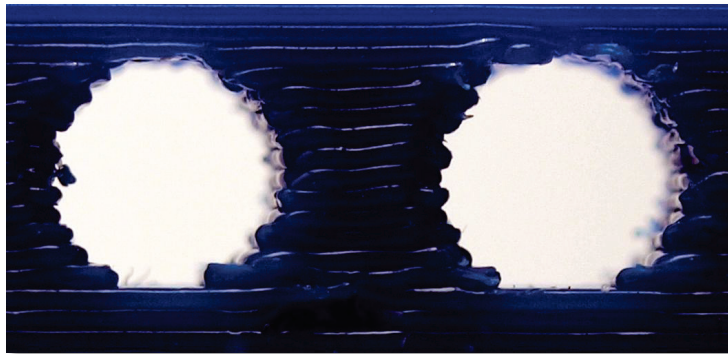
6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

BAUPROZESS



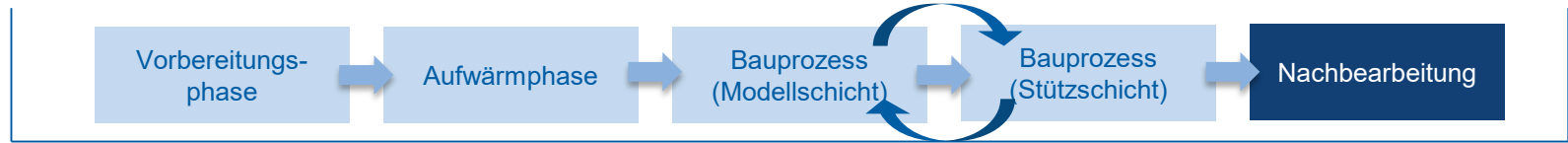
Form- und Maßhaltigkeit

- Die minimale Auflösung wird durch die Schichtstärke reglementiert

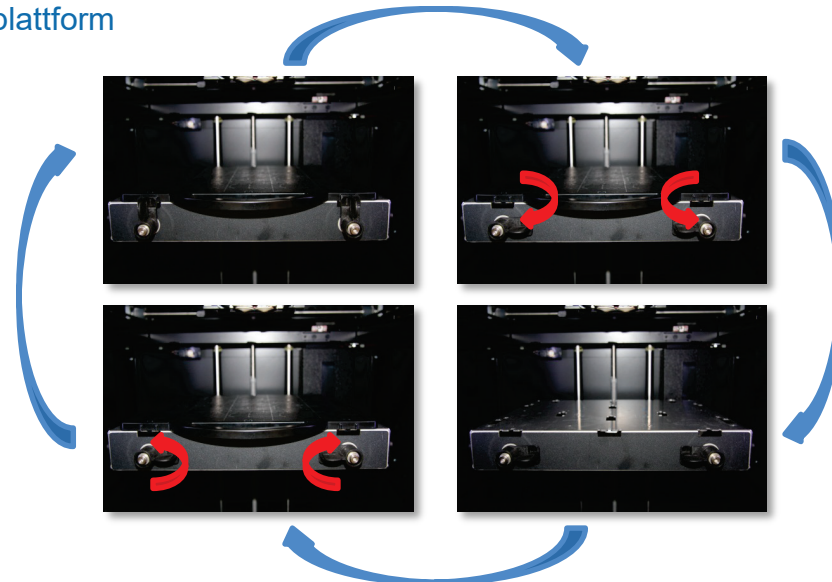


6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

NACHBEARBEITUNG

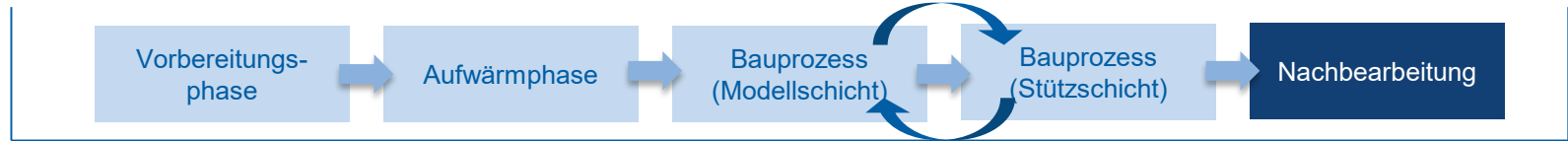


Entnehmen der Bauteilplattform



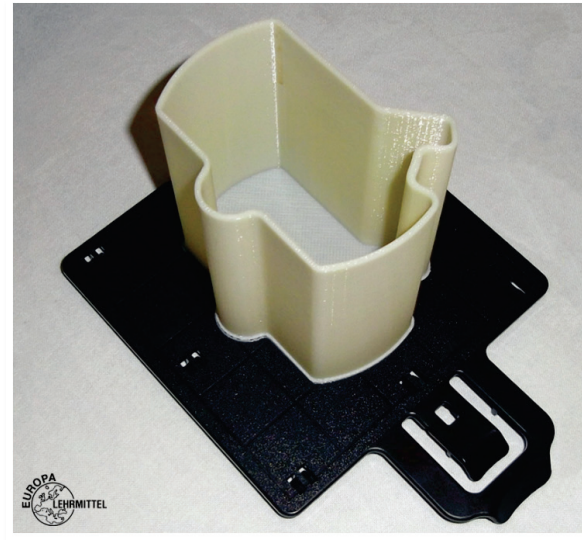
6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

NACHBEARBEITUNG



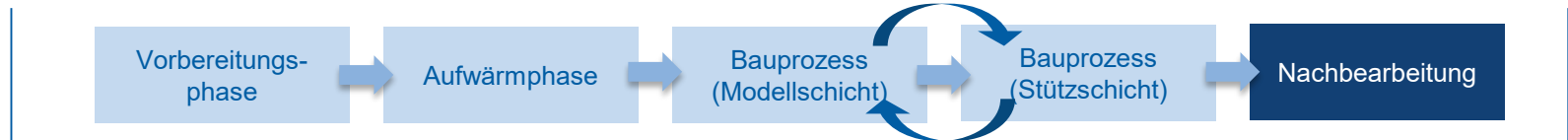
Bauplattform mit Bauteil(en) kann aus Anlage entnommen werden

- Bauteil durch Stützkonstruktionen mit der Bauplattform verbunden



6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

NACHBEARBEITUNG



Auswaschen der Stützen (setzt lösliches Supportmaterial voraus)

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

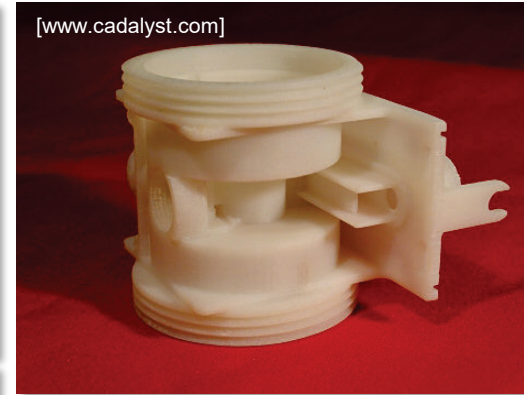
Entfernung des Stützmaterials durch:

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



6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

BEISPIELE



6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

BEISPIELE

Werkzeugkiste ABS



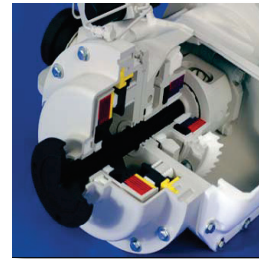
Automobilrückleuchte ABS



Kaffeekanne Polycarbonat



Kupplungsprototyp



6 Additive Fertigungsverfahren – 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

6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

ANLAGEN

Anlagentyp:	Dimension SST 1200
Hersteller:	Alphacam / Stratasys
Bauraum:	B 254 mm x T 254 mm x H 305 mm
Schichtdicke:	0,254 mm - 0,330 mm
Gewicht:	148 kg
Abmessungen:	838 mm x 737 mm x 1143 mm



6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

ANLAGEN

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



6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

ANLAGEN

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



6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

ANLAGEN

Anlagentyp:	Mojo
Hersteller:	Stratasys
Bauraum:	127 mm x 127 mm x 127 mm
Schichtdicke:	0,178 mm
Gewicht:	27 kg
Abmessungen:	630 mm x 450 mm x 530 mm



6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

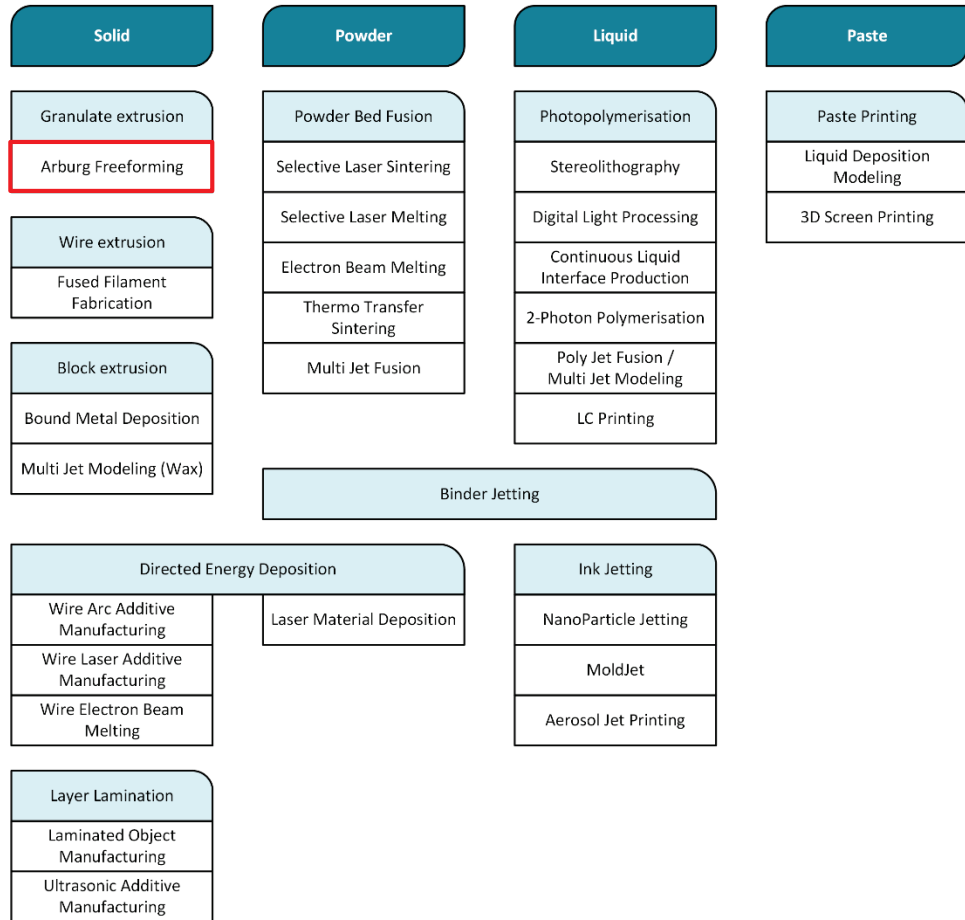
ANLAGEN

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



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

FREEFORMING: KURZBESCHREIBUNG

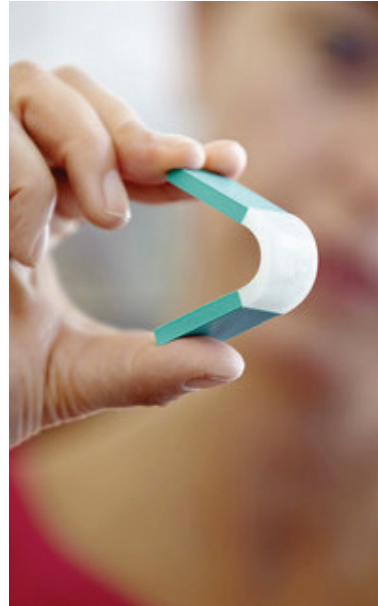
Bauprozess	Schicht-für-Schicht-Bauprozess durch Erweichen und lokales Auftragen thermoplastischen Materials mittels einer beheizten Düse oder eines Druckkopfs; unmittelbare Verfestigung des extrudierten Materials
Ausgangsmaterial	granulatförmig: ein oder zwei unterschiedliche Polymere (Bauteilmaterial,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

6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

ARBURG KUNSTSTOFF-FREIFORMEN

Werkstoffe

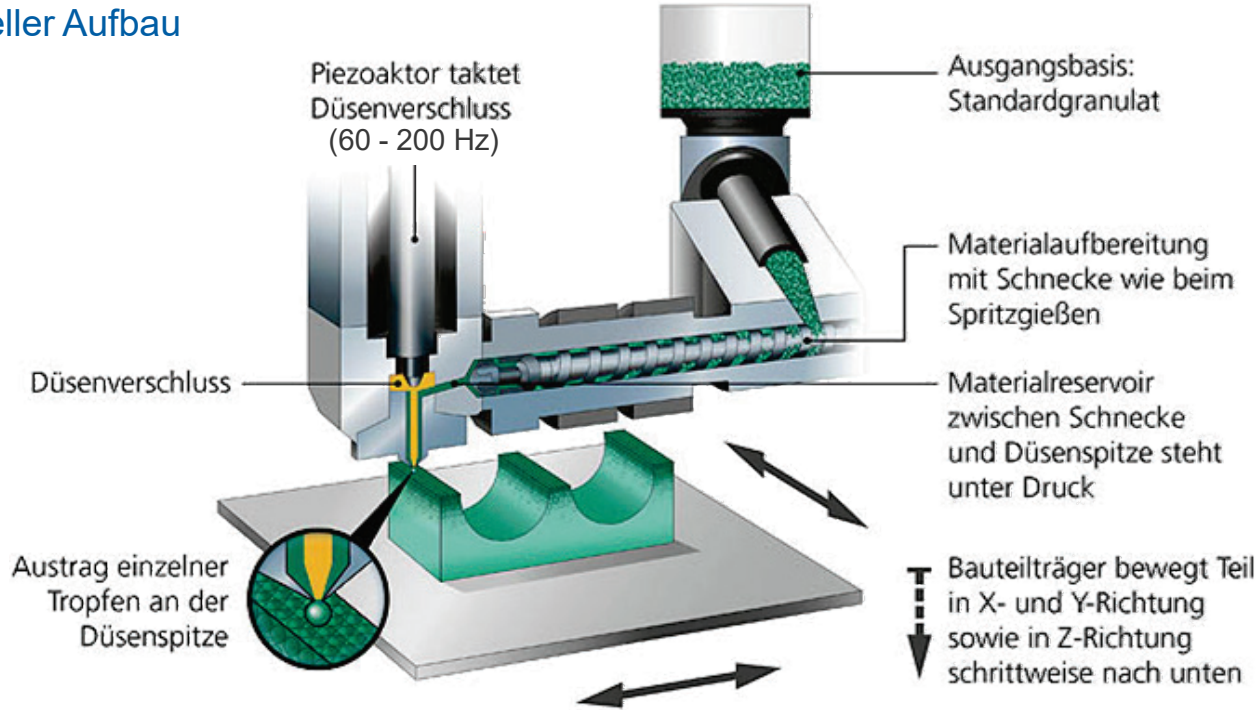
- Grundlage bilden handelsübliche, kostengünstige Kunststoff**granulate** für den Spritzguß
- Daher breite Werkstoffpalette nutzbar
- Kombinierbare Komponenten (PA, ABS, PC und TPU-Gummi) oder Farben sind möglich



6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

ARBURG KUNSTSTOFF-FREIFORMEN

Prinzipieller Aufbau



[www.arburg.com]

6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

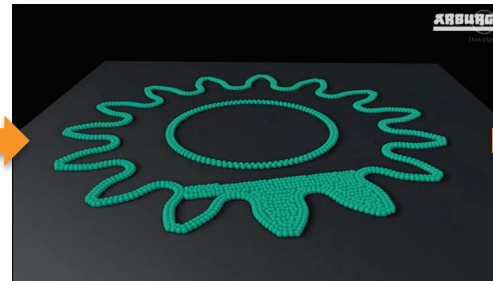
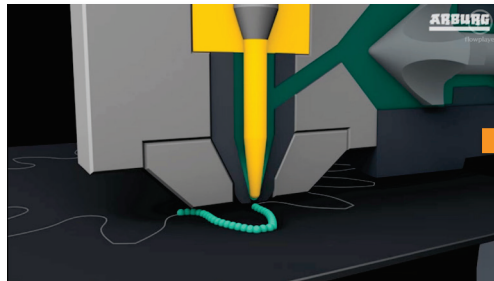
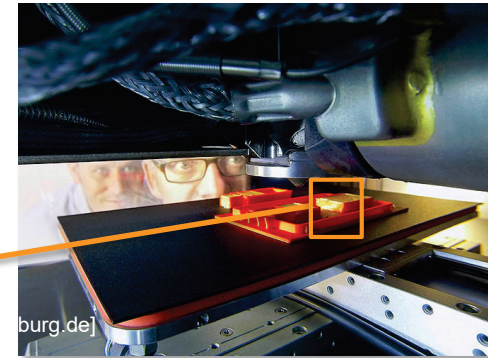
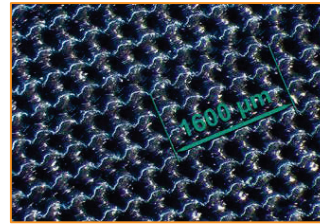
ARBURG KUNSTSTOFF-FREIFORMEN - VIDEO



ARBURG KUNSTSTOFF-FREIFORMEN - BAUPROZESS

Schichtaufbau

- Unter Druck erzeugte Kunststofftropfen
- Tropfenförmige, aber gleichmäßige Oberfläche
- Spurbreite etwa 100 µm
- Bauteil (Streichholzschachtelgröße) → 18 h Bauzeit



6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

ARBURG KUNSTSTOFF-FREIFORMEN - BAUPROZESS

Beeinflussung der Verarbeitungsparameter durch verschiedene Düsendrößen



6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

ARBURG KUNSTSTOFF-FREIFORMEN - BAUPROZESS

Zweite Auftragseinheit lässt sich für eine zusätzliche Komponente nutzen

- Verschiedene Farben
- Spezielle Haptik
- Hart-Weich-Verbindung



6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

ARBURG KUNSTSTOFF-FREIFORMEN - BEISPIELE

Büroschere mit individuell aufgebrachtter Beschriftung



[www.arburg.de]

Zweiteiliger Verschlusschieber



[www.kunststoff-schweiz.ch]

Schlauchschelle mit Gelenk aus PA



[www.arburg.de]

Elastischer Faltenbalg aus TPU



[www.arburg.de]

6 Additive Fertigungsverfahren – Material extrusion

ANLAGEN

Anlagentyp:	Freeformer
Hersteller:	Arburg
Bauraum:	230 x 135 x 250 mm
Schichtdicke:	0,1 mm - 0,3 mm
Bauteilgenauigkeit:	+/- 0,115
Wandstärke:	min. 0,6





Additive Fertigung

Additive Fertigung 21 – 06-06

Material Extrusion

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

