

FERTIGUNGSPLANUNG IN DER ADDITIVEN FERTIGUNG



Wintersemester 2020/21

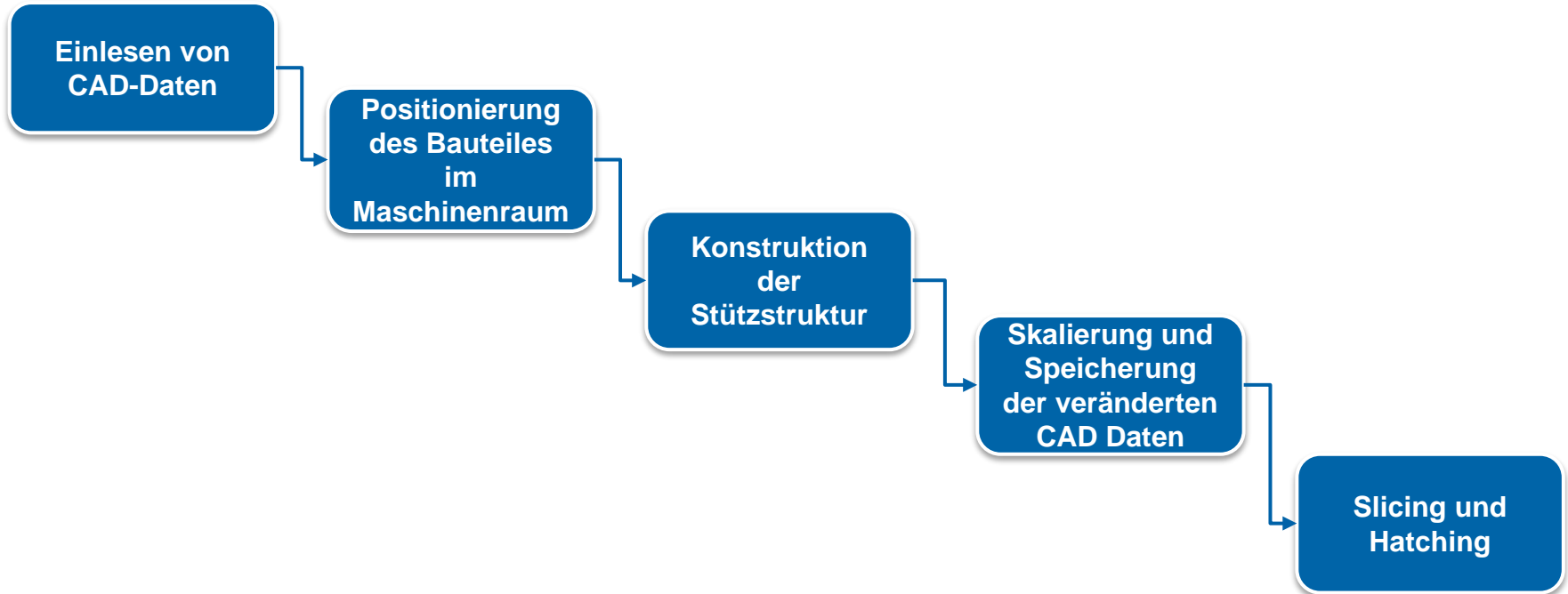
GLIEDERUNG

1. Einführung in das Thema Fertigungsplanung
2. Standardisierung in der AM
3. Prozesskette der Additiven Fertigung
4. Produktentstehungsprozess
5. Modelle und Prototypen
6. Rapid Manufacturing
7. Gestaltung der Additiven Fertigungsprozesse
 - 7.1. Additive Fertigungsverfahren
 - 7.2. Planung der Prozesse**
8. Nachbearbeitung von additiv gefertigten Teilen
9. Mechanische Bearbeitung
10. Qualitätssicherung und Prüfplanung
11. Kostenplanung

AUFBAU DER VORLESUNG: PLANUNG DER PROZESSE

7.2.1	Planung von Pre-Processing in der Additiven Fertigung	
	7.2.1	Konstruktive Aufbereitung von CAD-Daten
	7.2.3	Schichtdatenzerlegung
	7.2.4	CAD/CAM-Prozesskette
	7.2.5	Materialplanung
	7.2.6	Materialkreislauf und Recycling

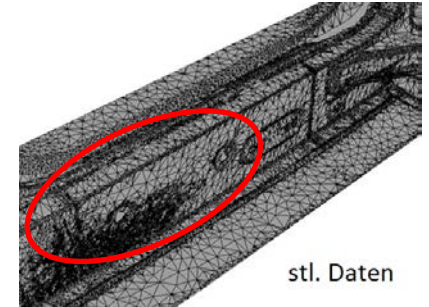
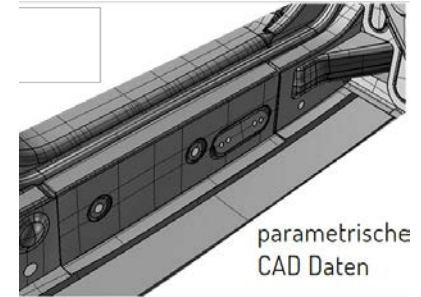
PRE-PROZESS: KONSTRUKTIVE AUFBEREITUNG VON CAD-DATEN



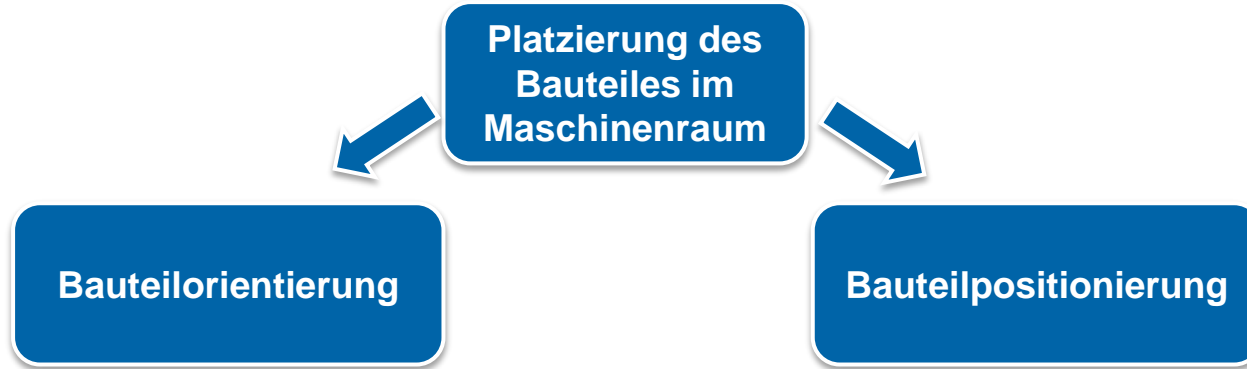
KONSTRUKTIVE AUFBEREITUNG VON CAD-DATEN

Einlesen von CAD-Daten

- Analysieren der Daten
- Erkennen von Problemstellen
- Lückenbereinigung von CAD-Daten
- Korrektur von falschen Normalenrichtungen der Flächen
- Beseitigung von Überlappungen



KONSTRUKTIVE AUFBEREITUNG VON CAD-DATEN



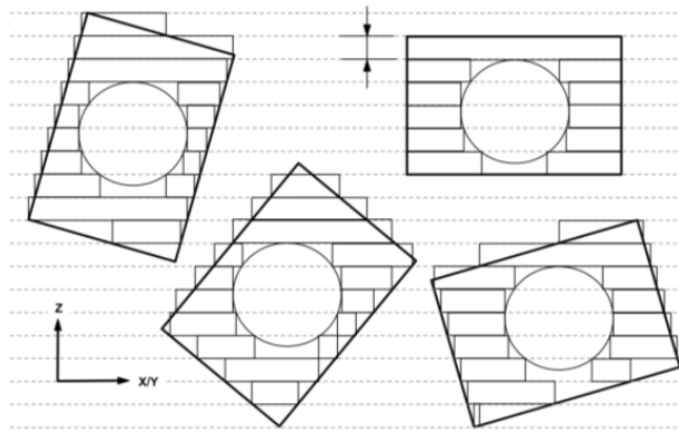
Ausrichtung des Bauteils im Bauraum, die durch Drehen des Bauteils um die Koordinatenachsen des Bauteilkoordinatensystems verändert wird.

Platzierung des Bauteils im Bauraum, die durch Translation des Bauteils entlang der Koordinatenachsen des Maschinenkoordinatensystems verändert wird.

EINFLÜSSE DER BAUTEILORIENTIERUNG

Effekte/Auswirkungen:

- Treppenstufeneffekt
- Aufrollen des Bauteiles (Curling)
- Oberflächenqualität
- Bauteilgenauigkeit
- mechanische Bauteileigenschaften
- Insel
- Überhang



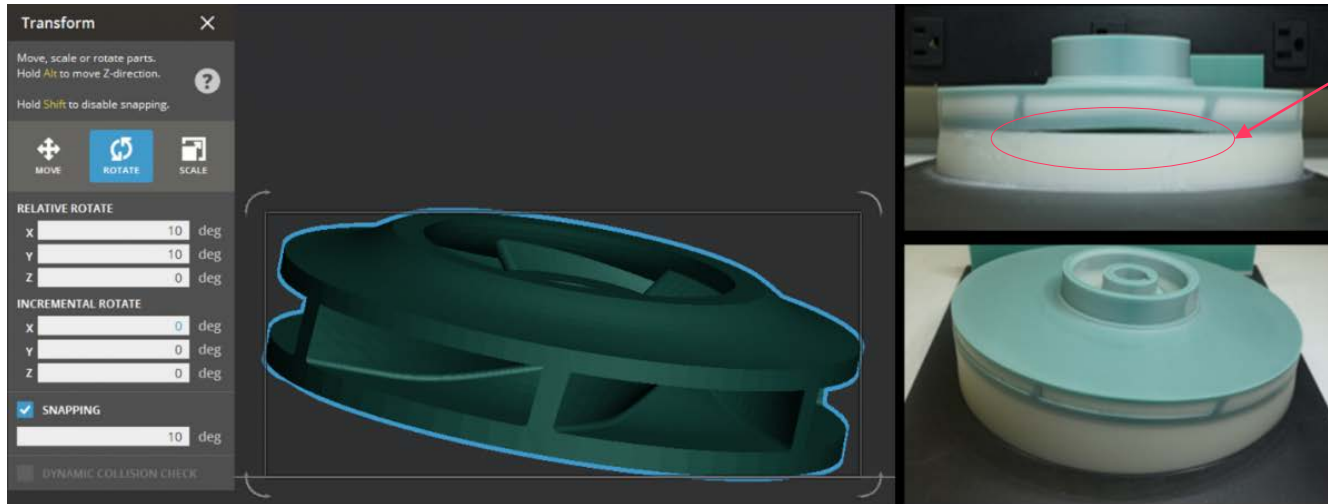
EINFLÜSSE DER BAUTEILORIENTIERUNG AUF DIE OBERFLÄCHENGÜTE



Auf dem Multi-Jet-Printer gedrucktes Wachmodell

Fertigungsplanung in der Additiven Fertigung

EINFLÜSSE DER BAUTEILORIENTIERUNG AUF DIE BAUTEILQUALITÄT



Bei Neigungswinkel 0°

Bei Neigungswinkel 10°

Auf dem Multi-Jet-Printer gedrucktes Wachsmodell

EINFLÜSSE DER BAUTEILORIENTIERUNG

Positiv für Prozessstabilität:

- Flächensprünge vermeiden, d.h. Teile beginnen mit kleinen Flächen und wachsen langsam in x-y Richtung. Hierbei sollte ein Grenzwinkel in Z-Richtung 15° nicht unterschritten werden, da sich sonst starke Stufen an der Bauteiloberfläche bilden.

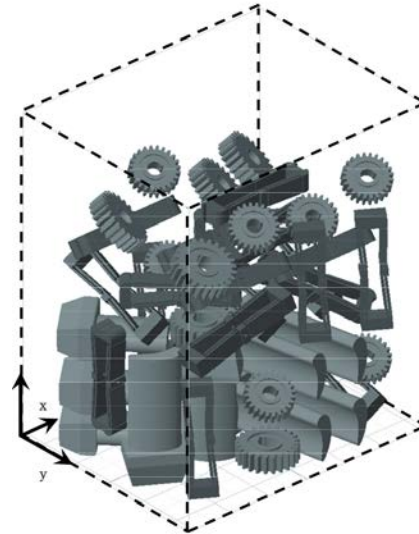
Positiv für Teilequalität und Bauzeit:

- Teile möglichst flach positionieren
- Achsen von zylindrischen Körpern, z.B. Bohrungen, die sehr genau sein sollen, möglichst senkrecht orientieren.

EINFLÜSSE DER BAUTEILPOSITIONIERUNG

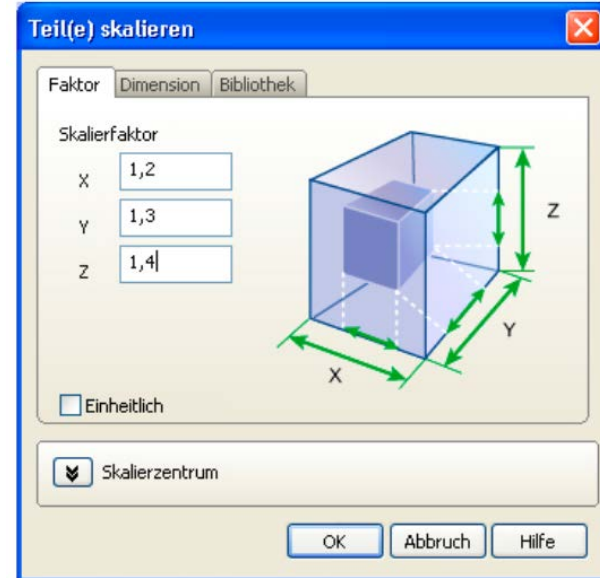
Effekte:

- Variierende mechanische Eigenschaften
- Variierende Oberflächenqualität und Formgenauigkeit
- Unterschiedliche Maschinenauslastung
- Komplexe Stützstrukturen



SKALIERUNG

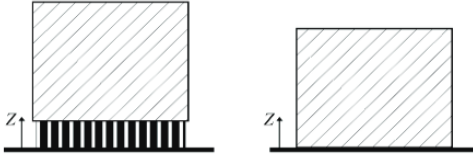
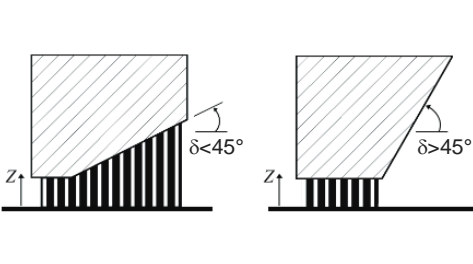
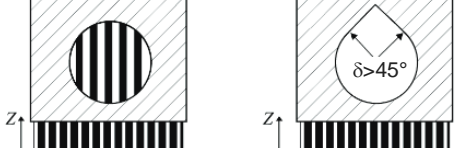
- Die Bauteile müssen skaliert werden, um den beim Prozess auftretenden Materialschwund auszugleichen.
- Die Skalierungsfaktoren für die Materialien hängen von Materialeigenschaften und Bauteilgrößen ab.
- Die Skalierung erfolgt in Bauposition. Nach der Skalierung darf das Bauteil nicht gedreht werden, da sonst eine Verzerrung der Geometrie entstehen kann.
- Der Schwund ist in der Regel nicht über den gesamten Bauraum gleich. Moderne Software ist in der Lage, unterschiedliche Skalierungsfaktoren für verschiedene Bauraumpositionen einzustellen.



KONSTRUKTION DER STÜTZSTRUKTUR

Aufgaben der Stützstruktur	Anforderungen an Stützstruktur	Stützkonstruktion verursacht
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fixierung des Bauteiles im Maschinenraum ▪ Verhinderung des Schrumpfens von Bauteilen im Prozess ▪ Verhinderung des Verzugs von Bauteilen im Prozess ▪ Leitung der Wärme auf die Bauplattform (bei Metallen) ▪ Sicheres Handling von Bauteilen im Post-Processing 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Leichtbau-Konstruktion ▪ Feine Anbindung an das Bauteil ▪ Platzierung der Stützen möglichst an ebenen Oberflächen ▪ leichte und rückstandslose Entfernung vom Bauteil ermöglichen ▪ Zugabe des zusätzlichen Materials für die Nachbearbeitung der Kontaktstellen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kosten durch zusätzlichen Materialverbrauch ▪ Zusätzliche und teilweise zeitintensive Nacharbeiten ▪ Probleme beim Lösen des Support-Materials ▪ Verminderte Oberflächenqualität durch bleibende Rückstände ▪ Erhöhte Zeit für die additive Fertigung

HINWEISE ZUR ANWENDUNG VON STÜTZKONSTRUKTIONEN

	<p>links: Anbindung des Bauteils auf der Bauplatte mit Stützkonstruktionen rechts: direkte Anbindung des Bauteils auf der Bauplatte ohne Stützkonstruktionen.</p>
	<p>links: Flächen mit Downskin-Winkel $\delta < 45^\circ$^{a)} benötigen üblicherweise Stützkonstruktionen. rechts: Flächen mit Downskin-Winkel $\delta > 45^\circ$^{a)} benötigen üblicherweise keine Stützkonstruktionen. Winkelabhängige Beeinträchtigungen der Oberflächengüte können auftreten.</p>
	<p>links: Bohrung mit enthaltener Stützstruktur rechts: Bohrung mit angepasster Form zur Vermeidung von Stützstrukturen nach.</p>

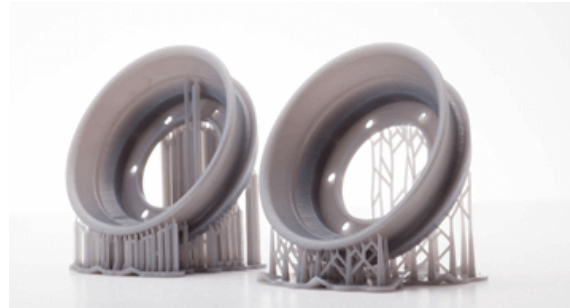
^{a)} abhängig von Material und Prozess / subject to material and process

KONSTRUKTIONSBESPIELE DER STÜTZSTRUKTUR

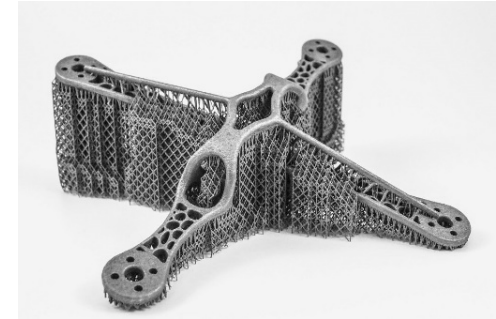
Photopolymer



Kunststoff

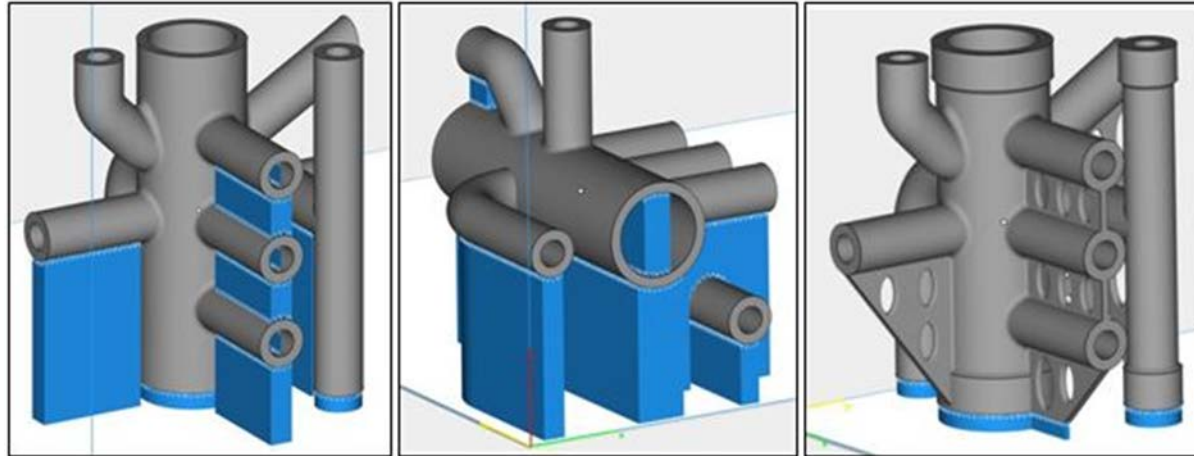


Metall



Konstruktion der Stützstruktur hängt stark von verwendeten Werkstoffen, AM-Verfahren und Anforderungen an Fertigteilparameter und –eigenschaften ab.

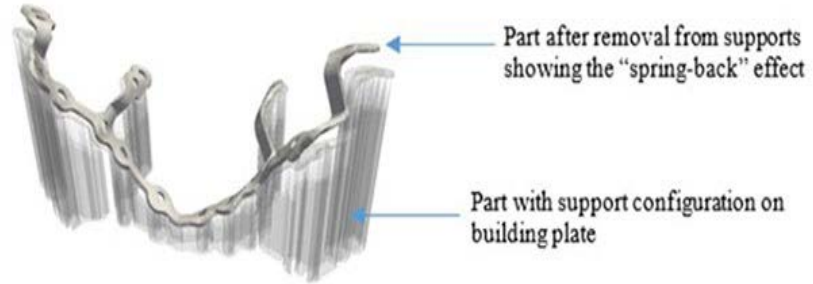
OPTIMIERUNG DER STÜTZSTRUKTUR



The design at the left and middle requires a lot of expensive support material (shown in blue), regardless of build orientation. The design at the right includes features that reduce support material to a minimum. The designs are courtesy of Olaf Diegel.

OPTIMIERUNG DER BAUTEILPOSITIONIERUNG

Ein Beispiel aus dem Bereich der Medizintechnik

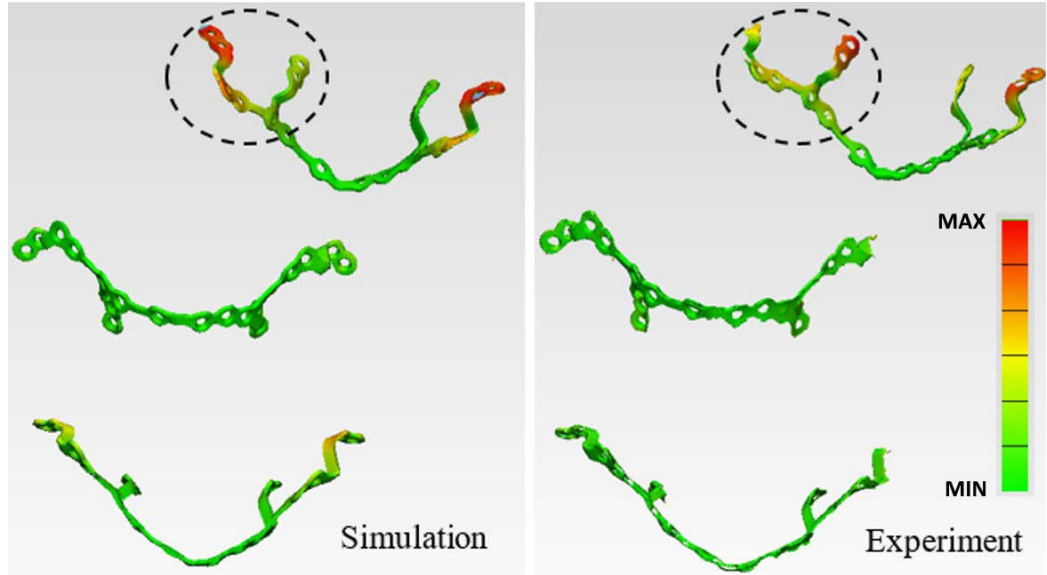


Das Kieferimplantat verformt sich unter Eigenspannungen nach der Entfernung der Stützstruktur.

SIMULATION DER POSITIONIERUNG

Ein Beispiel aus dem Bereich der Medizintechnik

- Das Magics-Simulationsmodul wurde eingesetzt um die kritischen Stellen am Bauteil auf Grundlage der Verformungsmodellierung zu zeigen.
- Die optimale Lage des Bauteiles im Bauraum zeigt minimale Formabweichungen (Bild in der Mitte, links).
- Die Messungen an gefertigten Bauteilen haben die Simulationsergebnisse bestätigt (Bild in der Mitte, rechts).



AUFBAU DER VORLESUNG

7.2.1	Planung von Pre-Processing in der Additiven Fertigung	
	7.2.1	Konstruktive Aufbereitung von CAD-Daten
	7.2.3	Schichtdatenzerlegung
	7.2.4	CAD/CAM-Prozesskette
	7.2.5	Materialplanung
	7.2.6	Materialkreislauf und Recycling

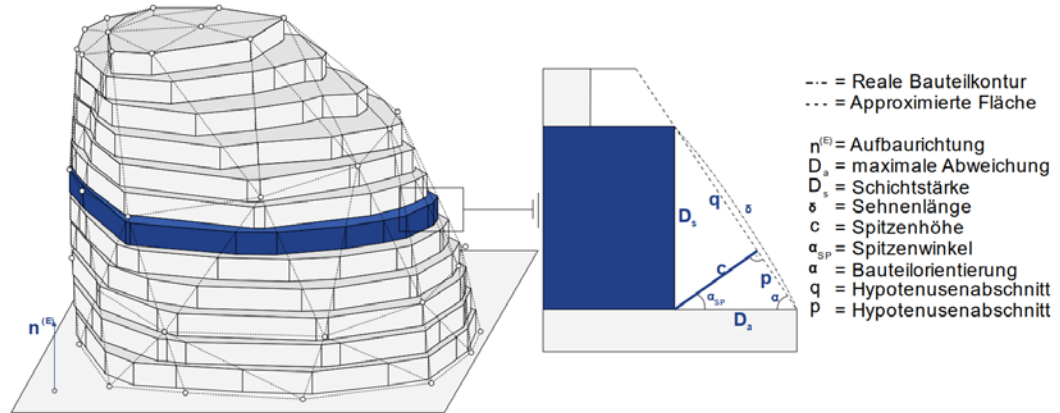
Fertigungsplanung in der Additiven Fertigung

SLICING

- Der Vorgang des Slicens umfasst das Zerschneiden des Facetten- (Oberflächen-) Modells in eine Vielzahl von zu bauenden Schichten, die für die Steuerung der Anlage entsprechende Informationen besitzen.
- Nach dem Slicing ist kein nachträgliches Skalieren mehr möglich, da die „geslicten“ Konturdaten untereinander keinen Bezug mehr in z-Richtung besitzen.
- Bei einigen Technologien wird dieser Prozess – nach Einstellung erforderlicher Parameter (z.B. Schichtdicke) –selbstständig von der Software ausgeführt. In Abhängigkeit von den Fertigungsanlagen erfolgt die Aufbereitung und Speicherung dieser Schichtdaten durch separate, herstellerepezifizierte Software.

Bereitstellung der Schichtinformationen

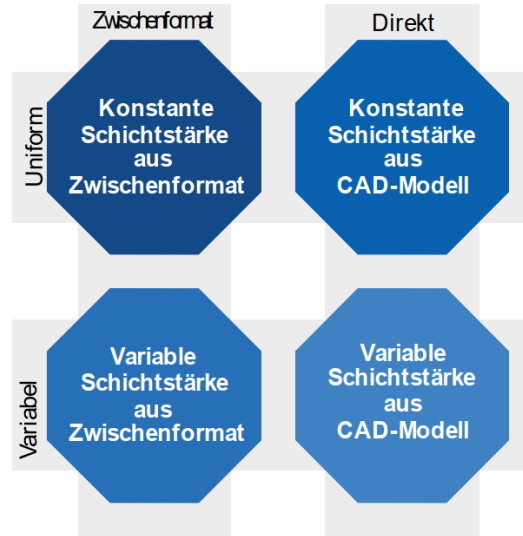
Zerlegung des 3D-CAD-Modells in ein 2,5D-Schichtkonturmodell



STRATEGIEN ZUR SCHICHTDATENZERLEGUNG

Mathematische Zerlegung der Geometrieprepräsentation

Konturschnitte werden in die aktuelle Höhenkoordinate des 3D-Modells gelegt



METHODEN ZUR ADAPTIVEN SCHICHTZERLEGUNG

Inkrementelle Zerlegung

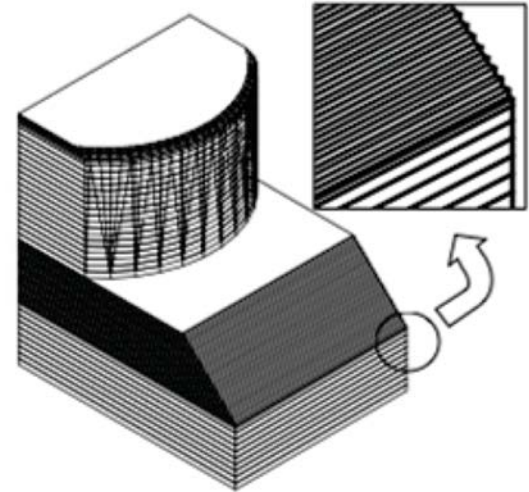
Das Bauteil wird in einem einzigen Zyklus schichtweise auf die maximal zulässige Schichtdicke hin untersucht. Unterscheidungsmerkmale der entwickelten Konzepte sind die unterschiedlichen Ansätze zur Quantifizierung des Fehlermaßes der Geometrieabweichung.

Top-Down-Zerlegung

Im Gegensatz zur inkrementellen Vorgehensweise erfolgt die Schichtzerlegung zunächst mit einer großen Schichtdicke. In einem weiteren Schritt werden, je nach Anforderung an die Bauteilgenauigkeit, die einzelnen Schichten iterativ verfeinert.

Bottom-Up-Zerlegung

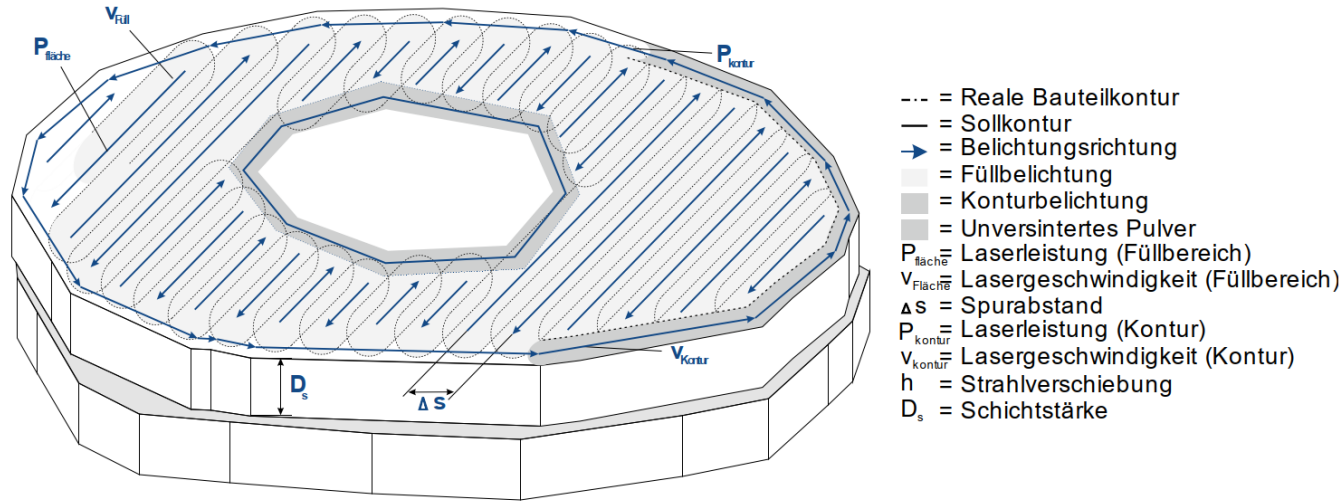
Das zu fertigende Objekt wird in Schichten mit kleiner Dicke zerlegt. Anschließend werden aufeinanderfolgende Schichten mit geringen Abweichungen zwischen den Schnittkonturen sequenziell zusammengefasst, so dass sich die Schichtdicke ohne nennenswerte Verringerung der Abbildungsgenauigkeit erhöhen lässt.



HATCHING

Erzeugung der Belichtungsbahnen

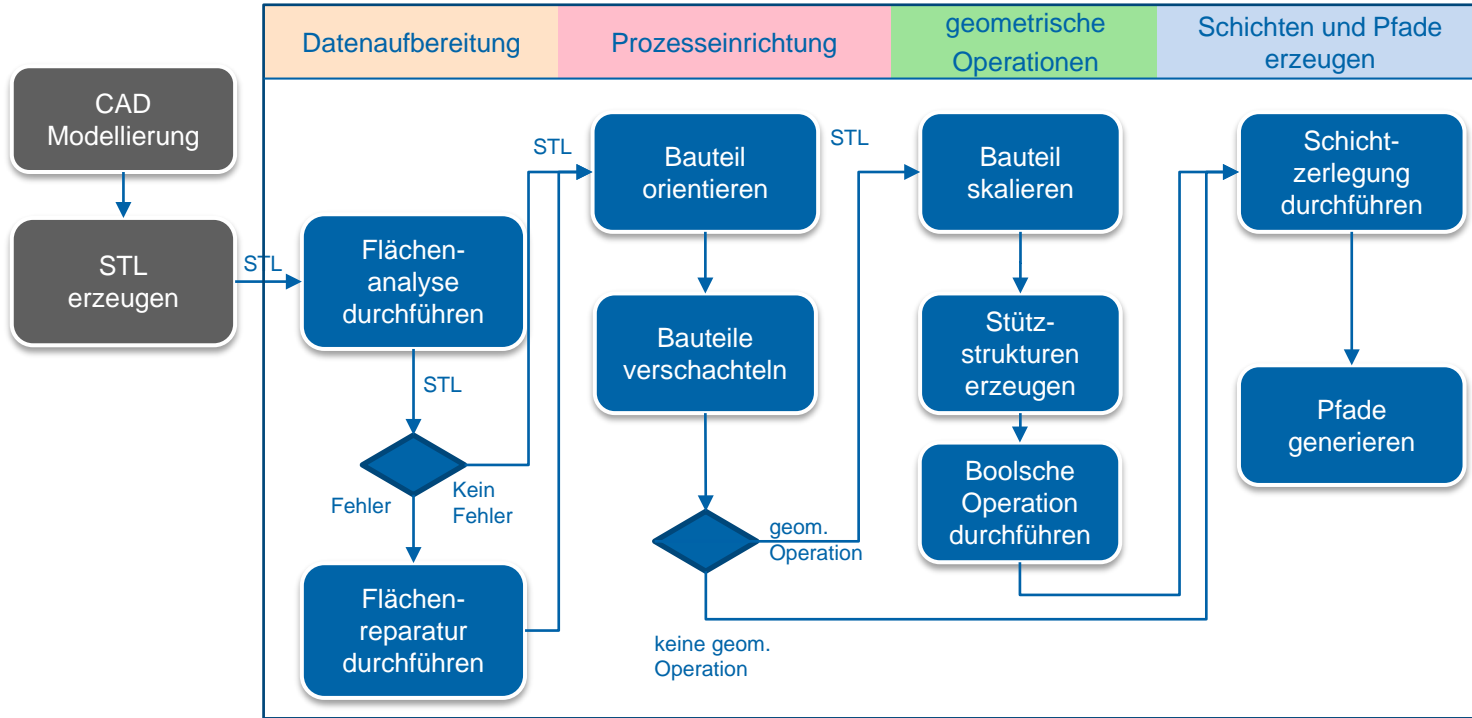
Nach der Schichtdatengenerierung und den dadurch erzeugten geometrischen Schichtinformationen müssen die anlagen- und prozessspezifischen Parameter definiert werden



AUFBAU DER VORLESUNG

7.2.1	Planung von Pre-Processing in der Additiven Fertigung	
	7.2.1	Konstruktive Aufbereitung von CAD-Daten
	7.2.3	Schichtdatenzerlegung
	7.2.4	CAD/CAM-Prozesskette
	7.2.5	Materialplanung
	7.2.6	Materialkreislauf und Recycling

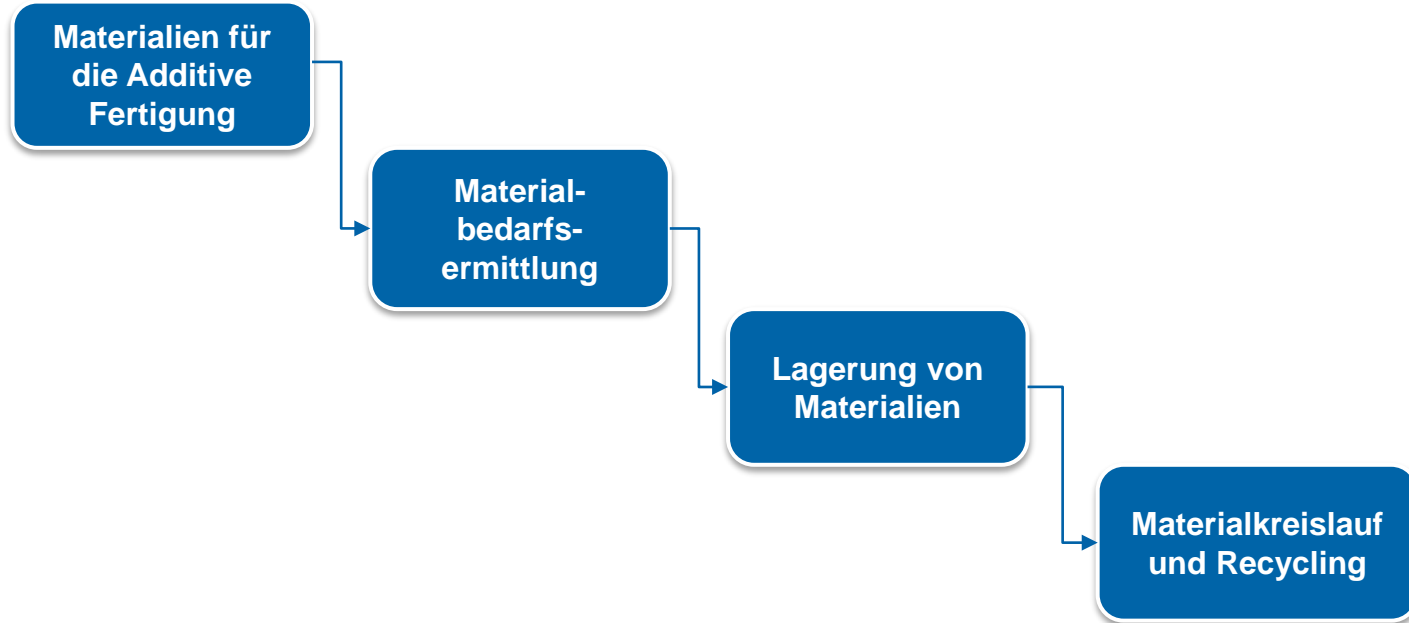
CAD/CAM-PROZESSKETTE ADDITIVER FERTIGUNG



AUFBAU DER VORLESUNG

7.2.1	Planung von Pre-Processing in der Additiven Fertigung	
	7.2.1	Konstruktive Aufbereitung von CAD-Daten
	7.2.3	Schichtdatenzerlegung
	7.2.4	CAD/CAM-Prozesskette
	7.2.5	Materialplanung
	7.2.6	Materialkreislauf und Recycling

MATERIALPLANUNG



MATERIALIEN FÜR DIE ADDITIVE FERTIGUNG

- Kunststoffe
 - Standardkunststoffe (**ABS**; PS)
 - Technische Kunststoffe (PSU; PC; **PA**; TPE)
 - Hochleistungskunststoffe (PEI; **PEEK**)

- Metalle
 - Aluminium
 - Titan
 - Stahl
 - Nickel-Basis Superlegierungen

- Naturstoffe
 - Sand
 - Gips
 - Keramik
 - Holzmehl



MATERIALKOSTEN

Aluminium Pulver	IN 718 Pulver	Titan Pulver	Werkzeugstahl Pulver
50-70 €/kg	90-120 €/kg	300 €/kg	60 €/kg

Stereolithographie Harz	Polyamid Pulver	LLM Papier	Miscanthus Pulver	Holz Filament	ABS Filament
200 €/kg	60-90 €/kg	15 €/kg	50 €/kg	60-160 €/kg	50-380 €/kg

MATERIALLIEFERANTEN

- Materialien werden hauptsächlich vom Hersteller für ihren Prozess entwickelt und vertrieben. Es bestehen langjährige Erfahrungen mit diesen Materialien. Eigenschaften und Verhalten dieser Werkstoffe während der Additiven Fertigung sind gut bekannt.
- Verwendung von handelsüblichem (nicht vom Hersteller zertifiziertem) Pulver kann zur Abweichung der Prozessführung und damit der Bauteilqualität führen. Vor der Anwendung sollten diese Materialien aufbereitet werden. Um eine qualitätssichere Prozessführung zu realisieren, ist eine eigene Prozessoptimierung erforderlich.
- Nach der Qualifizierung eines geeigneten Materialsystems in der Praxis wird es üblicherweise für die Produktion festgelegt, um ständigen Werkstoffwechsel zu vermeiden.

MATERIALBEDARFSPLANUNG

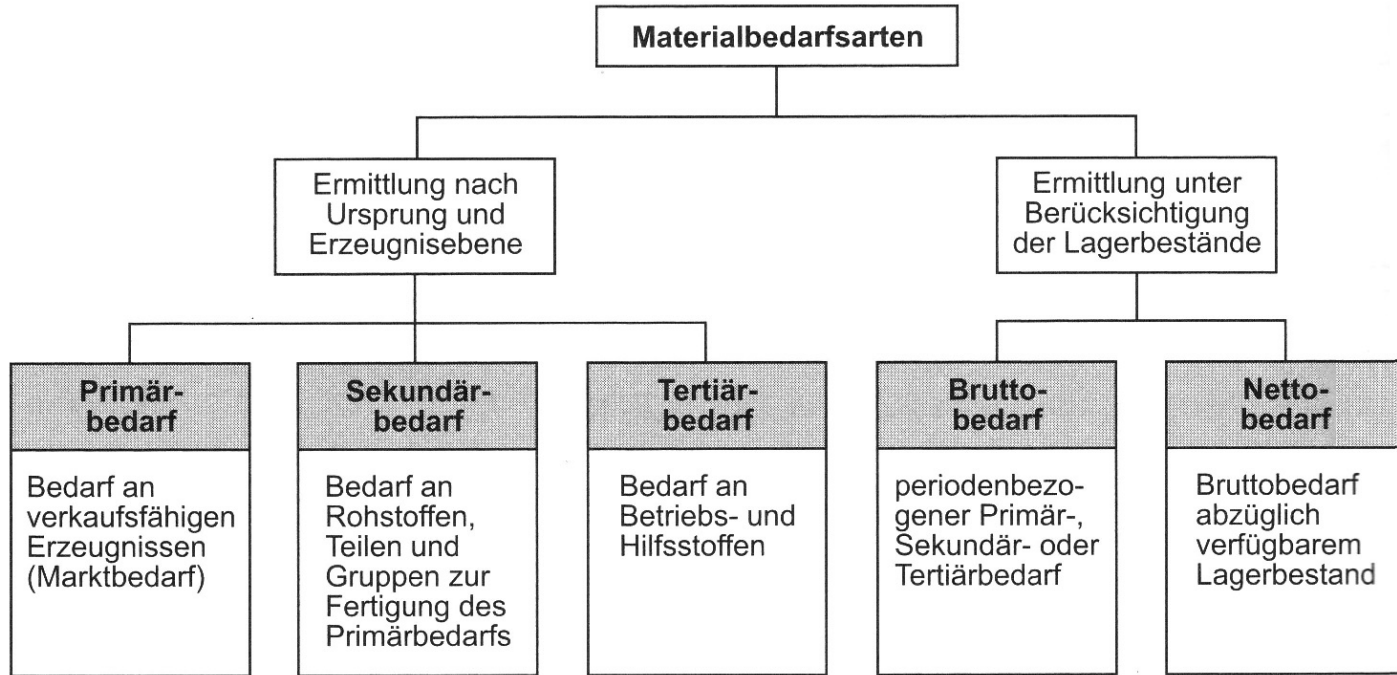
Daten:

- Stückzahl
- Volumen des Bauteiles und dazugehöriger Supports
- Binderanteil
- Anteil des Altmaterials
- Terminplan

Methoden:

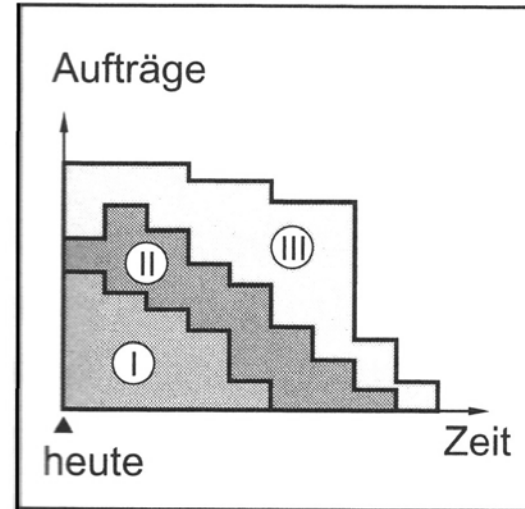
- Bedarfsgesteuerte Materialplanung
- Verbrauchsgesteuerte Materialplanung
- Geschätzte Materialplanung

MATERIALBEDARFSPLANUNG



BEDARFGESTEUERTE MATERIALPLANUNG

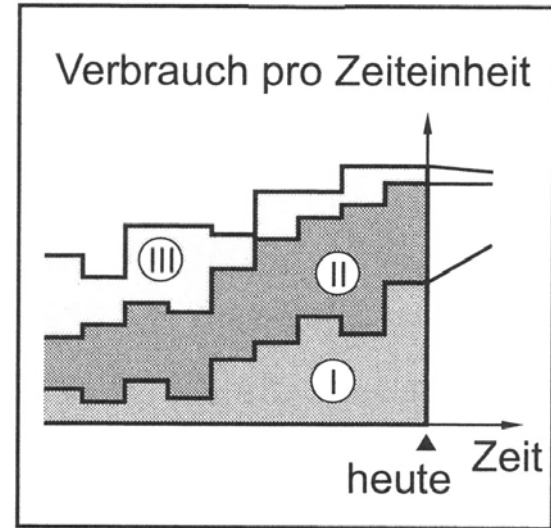
- Bedarfsgesteuerte, auch deterministische, Bedarfsermittlung erfolgt anhand von vorliegenden Kunden- oder Vorratsaufträgen. Diese Methode ist für Serienfertigung typisch.
- Aufgrund dieser Informationen werden Primärbedarf (Bedarf an verkaufsfähigen Erzeugnissen, z.B. gedruckte Teile), Sekundärbedarf der geplanten Erzeugnissen (Rohstoffe, z.B. Kunststoff- oder Metallpulver) und Tertiärbedarf (Betriebs und Hilfsstoffen, z.B. Bindermittel, Spülmittel für den Druckkopf, Strahlmittel) ermittelt.
- Bedarfsgesteuerte Materialplanung bestimmt die Kapazitätsplanung mit. Deshalb werden die Materialien unter Berücksichtigung der Durchlaufzeiten geplant und rechtzeitig beschafft.



I, II und III sind verschiedene Produkte

VERBRAUCHSGESTEUERTE MATERIALPLANUNG

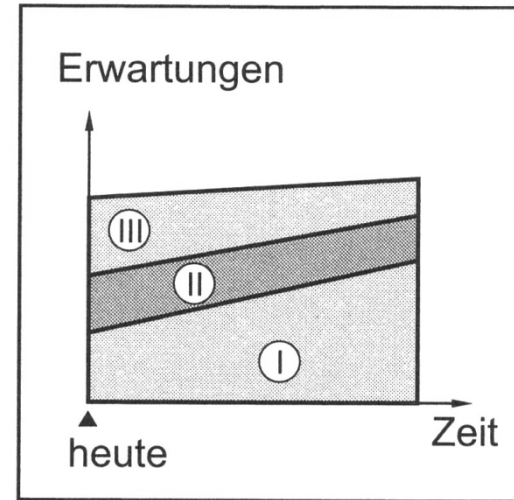
- Verbrauchsgesteuerte, auch stochastische, Bedarfsermittlung, bezieht sich auf keinen konkreten Einzelauftrag. Diese Methode ist eher für Einzel- und Kleinserienfertigung geeignet.
- Bedarfsbestimmung erfolgt anhand der Verbrauchswerte aus der Vergangenheit (z.B. Produkt I, Produkt II oder Produkt III).
- Mit diesen Daten wird der künftige Verbrauch des jeweils betrachteten Materials unabhängig von Fertigungsplanung und –steuerung prognostiziert.
- Hier sind Material- und Lagerkosten, sowie Haltbarkeit bei teuren und empfindlichen Materialien zu beachten.



I, II und III sind verschiedene Produkte

GESCHÄTZTE MATERIALPLANUNG

- Geschätzte, auch heuristische, Bedarfsermittlung, geht vom einzelnen Artikelbedarf aus. Diese Methode ist eher für Einzelfertigung geeignet.
- Bedarfsbestimmung erfolgt entweder analog der Ergebnisse der Vorhersage für vergleichbare Erzeugnisse, oder intuitiv anhand der Erfahrungen.
- Hier sind auch Material- und Lagerkosten, sowie Haltbarkeit bei teuren und empfindlichen Materialien zu beachten



I, II und III sind verschiedene Produkte

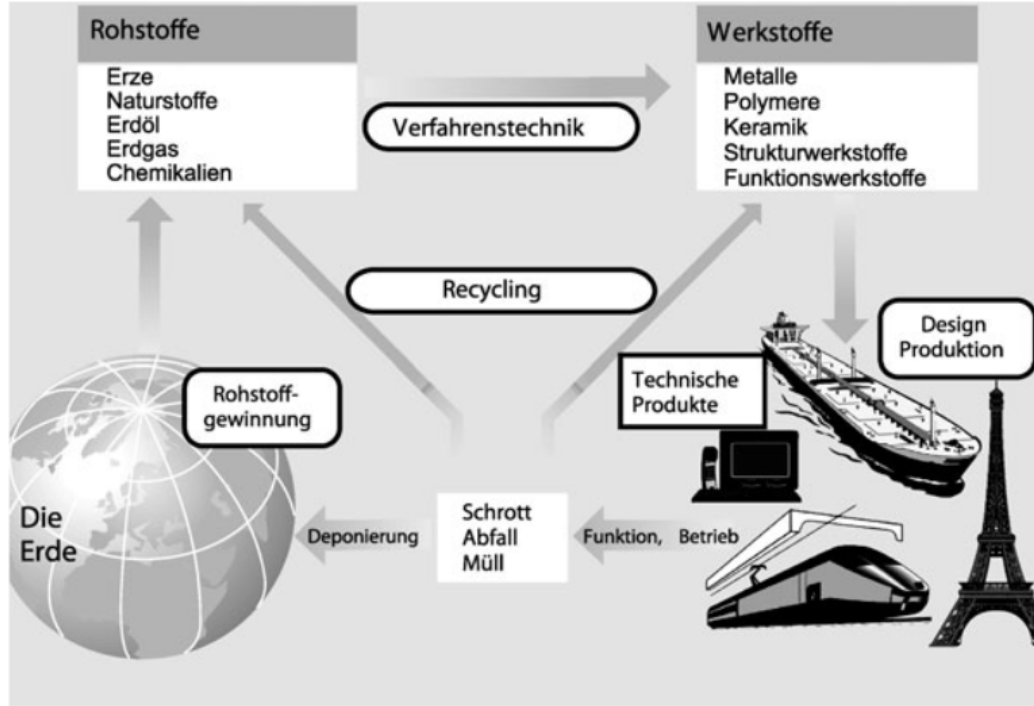
LAGERUNG VON MATERIALIEN

- zeitliche und räumliche Lagerung der beschafften und produzierten Güter planen.
- Stoffe, von denen eine Gefährdung der Gesundheit und der Sicherheit der Beschäftigten und der Umwelt ausgeht, müssen im dafür vorgesehenen Schutzbereich gelagert werden.
- empfindliche Rohmaterialien, die durch höhere Luftfeuchtigkeit und Temperatur ihre physikalischen und chemischen Eigenschaften ändern können, sollten in einem geschützten Bereich gelagert werden. Hier sollten die empfohlenen Lagerbedingungen des Herstellers eingehalten werden.
- Lagerdauer begrenzen, um physikalische oder chemisch induzierte Alterung von Materialien zu vermeiden

AUFBAU DER VORLESUNG

7.2.1	Planung von Pre-Processing in der Additiven Fertigung	
	7.2.1	Konstruktive Aufbereitung von CAD-Daten
	7.2.3	Schichtdatenzerlegung
	7.2.4	CAD/CAM-Prozesskette
	7.2.5	Materialplanung
	7.2.6	Materialkreislauf und Recycling

MATERIALKREISLAUF UND RECYCLING



Quelle: Czichos, H. Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften. Springer Verlag, 2002.

MATERIALKREISLAUF UND RECYCLING

- Die in der Additiven Fertigung verwendeten Werkstoffen bestehen aus natürlichen und synthetischen Stoffe, die mittels mehrstufiger Verarbeitungsprozesse in einsatzfähige Form gebracht werden. Dieser energieaufwendige Prozess verlangt den ressourceneffizienten und umweltschonenden Umgang mit Werkstoffen.
- Charakteristisch für die AM ist, dass je nach der Jobbelegung nicht alle verarbeiteten Werkstoffe im Prozesses verbraucht werden. Dadurch entstehende Abfälle sind aufgrund ihrer veränderteren Eigenschaften nicht ohne weiteres wiederverwendbar. Besonders hoch ist der Anteil der nicht gebundenen Werkstoffe im SLS-Prozess. Um den Werkstoffverbrauch effizienter zu gestalten, bieten viele Hersteller geschlossene Materialkreislaufsysteme, die es ermöglichen, die direkt aus der Jobbox ausgesaugten Pulver nach der Verarbeitung wieder dem Prozess zuzuführen.
- Einer der Technologievorteile der AM ist die Möglichkeit zur Anwendung von bioabbaubaren Werkstoffen. Die verwendeten Werkstoffe lassen sich biologisch komplett abbauen und können dadurch zu einer besseren Kreislaufwirtschaft beitragen.

BIOBASIERTE UND -ABBAUBARE WERKSTOFFE ALS NEUE DRUCKMATERIALIEN

- Biologisch abbaubare Werkstoffe sind die Werkstoffe, die durch Mikroorganismen, bzw. Enzyme im Boden abgebaut werden können. Nach dem Abbauprozess entstehen Spaltprodukte wie Wasser, Kohlendioxid und Biomasse.
- Viele, aber nicht alle, auf nachwachsenden Rohstoffen basierenden Biomaterialien sind biologisch abbaubar.
- Miscanthus, als nachwachsender Rohstoff, bietet ein großes Potential für den Einsatz als Druckmaterial.
- Miscanthus ist eine C4-Pflanze mit hoher Biomassezuwachsrate. Sie ist kostengünstig anzubauen.



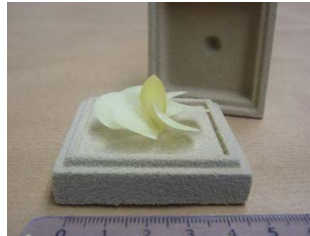
3D DRUCKEN VON MISCANTHUS -PULVERN



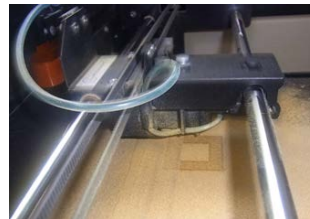
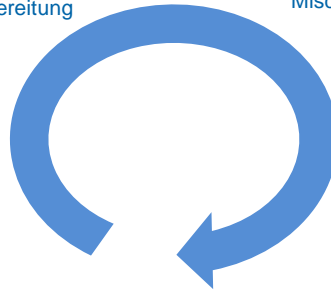
Miscanthus ohne Aufbereitung



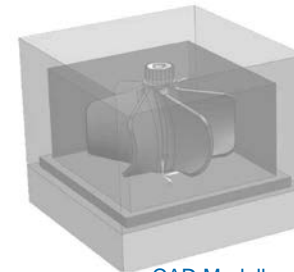
Miscanthus nach Aufbereitung



Verpackung für
Wachsmodell



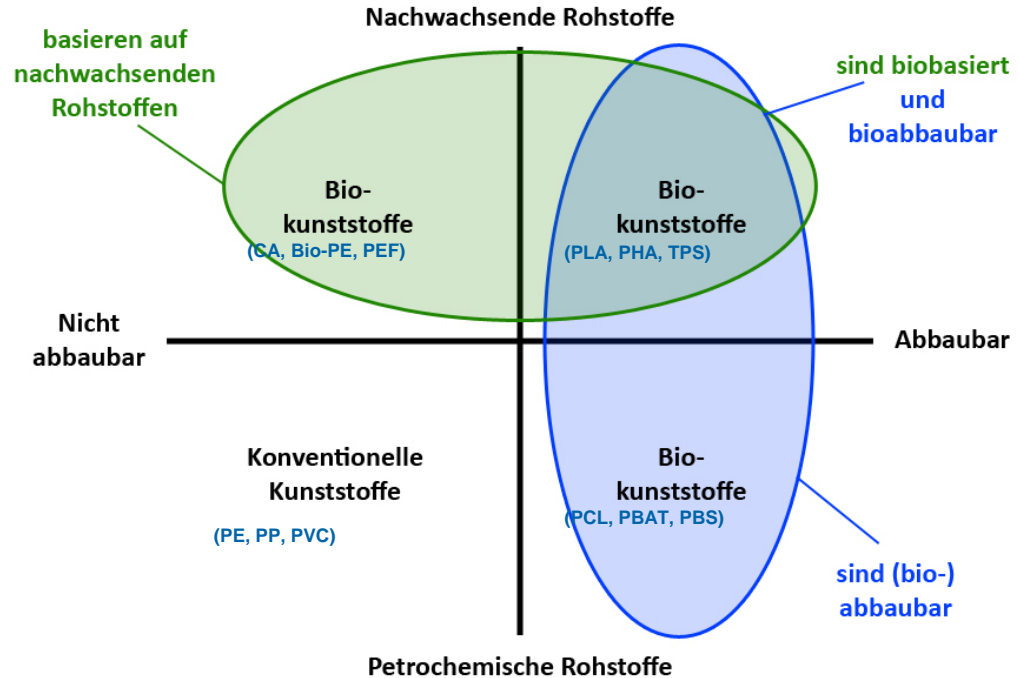
Drucken



CAD Modell

BIOKUNSTSTOFFE

- Als Biokunststoff, Bioplastik oder biobasierte Kunststoffe bezeichnet man Kunststoffe, die zum wesentlichen Anteil oder sogar ausschließlich aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen. Aber auch einige petrochemische - also ölbasierte - Kunststoffe fallen in diese Kategorie, wenn sie abbaubar sind.
- Der Begriff Biokunststoff umfasst daher eine große Kategorie: Nicht alle Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen sind abbaubar, während einige ölbasierte Kunststoffe hingegen kompostierbar sind.



Fertigungsplanung in der Additiven Fertigung

BIOKUNSTSTOFF-HERSTELLUNG

Verfahren/ Rohstoffe	Beispiele biobasierter Kunststoffe
Modifizierung von nachwachsenden Rohstoffen	Celluloseacetat (CA)
	Celluloseregenerat (CR)
	Thermoplastische Stärke (TPS)
Chemische Synthese biotechnologisch hergestellter Polymerrohstoffe	Polylactid (PLA)
	Bio-Polyethylen (Bio-PE)
	Polyethylenfuranoat (PEF)
Direkte Biosynthese der Polymere	Polyhydroxyalkanoat (PHA): z. Bsp.
	Polyhydroxybutyrat (PHB)

THERMOPLASTISCHE FILAMENTE AUS BIOKUNSTSTOFF



BIOKUNSTSTOFF IN DER ANWENDUNG



Becher aus BENDLAY Filament

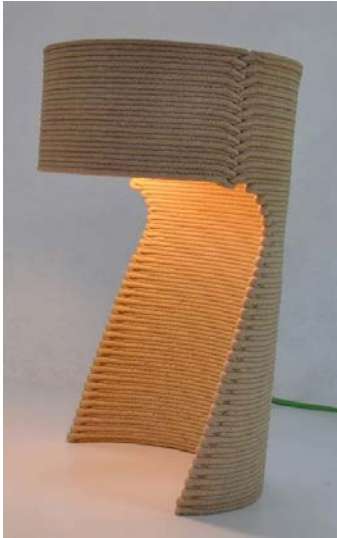


Wärmebeständiges
Polylactid für den 3D-
Druck, ITRI/ Taiwan



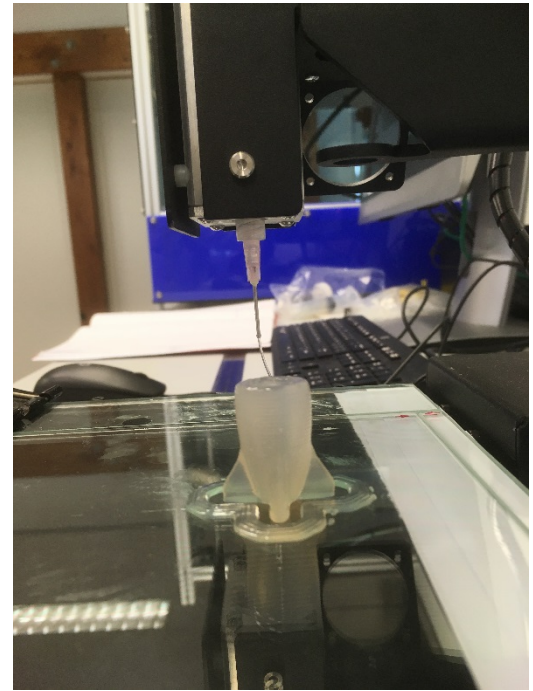
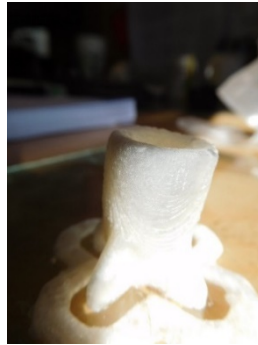
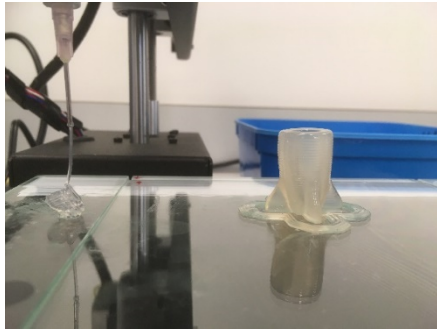
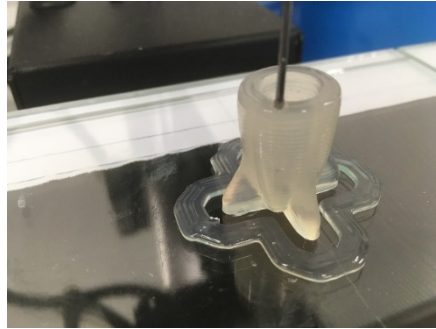
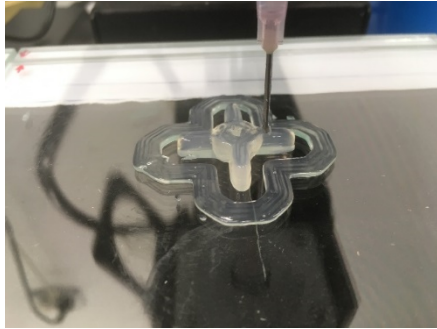
Transparenter Verbund
aus Chitin und
Seidenproteinen –
Shriik © Harvard/ USA

HOLZFASER KOMPOSITE- HOLZFILAMENT



Fertigungsplanung in der Additiven Fertigung

DAS CELLULOSE BASIERTE HYDROGEL



Fertigungsplanung in der Additiven Fertigung

„4D-DRUCKEN“ MIT FORMGEDÄCHTNISLEGIERUNGEN AUS KUNSTSTOFF

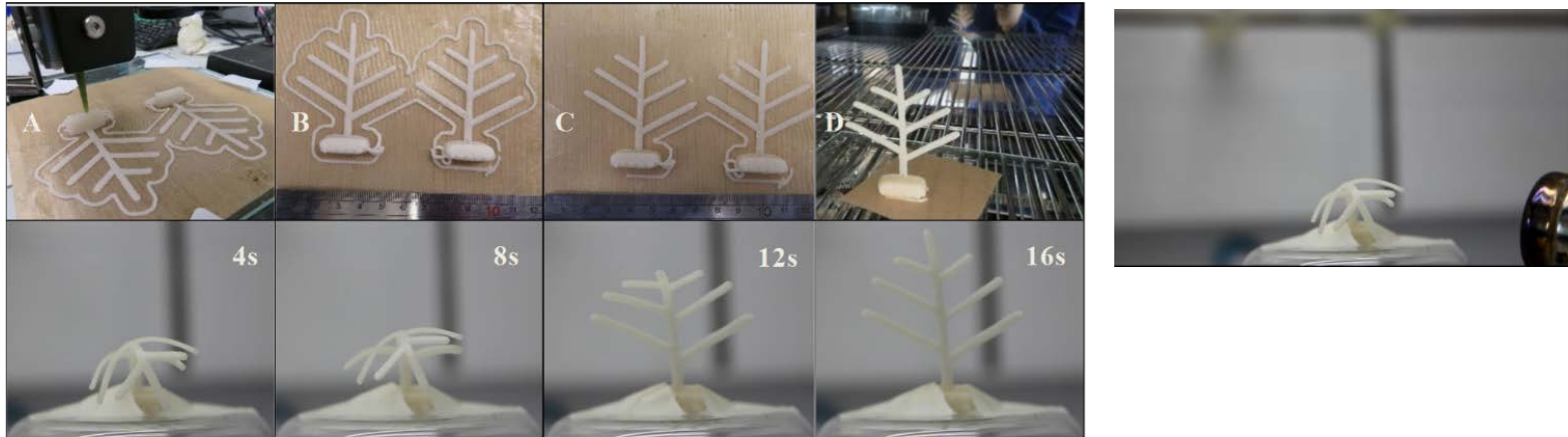
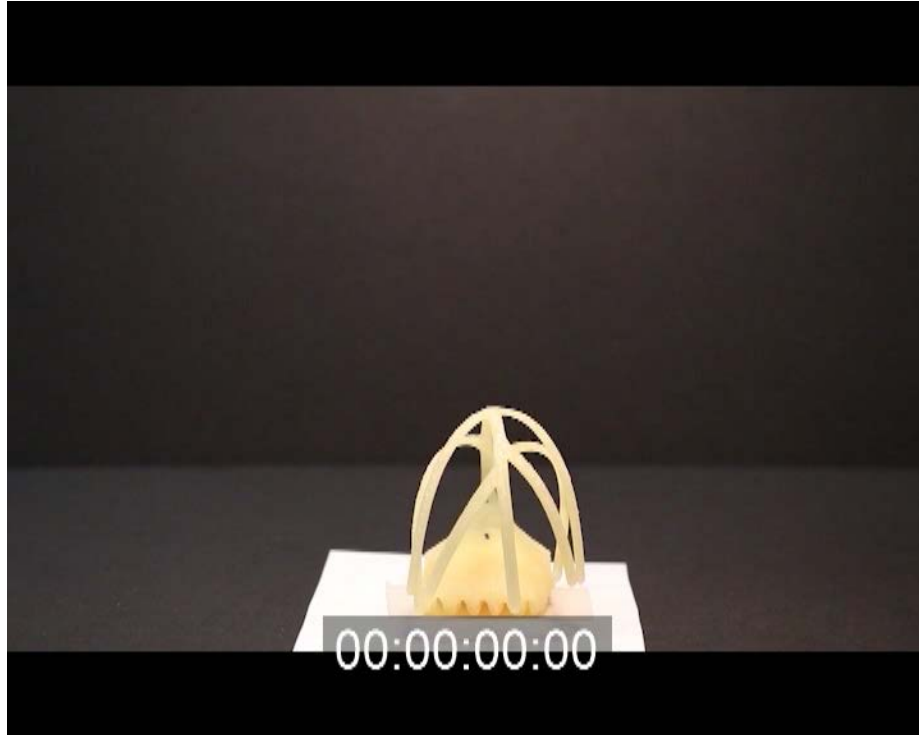


Fig. 1 3D printing and shape memory demonstration. (A) printing in progress, (B) pre-cure structures, (C) structures following 18 hours curing in 105°C oven, (D) structure standing in oven set to 105°C, (bottom row) transition away from temporary shape over 16 seconds during heating with hot-air gun.

FGL-BEISPIEL: ZELLULOSE-BASIERTES HYDROGEL





Fertigungsplanung in der Additiven Fertigung

Fertigungsplanung in der Additiven Fertigung 2020 – 07/2

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

