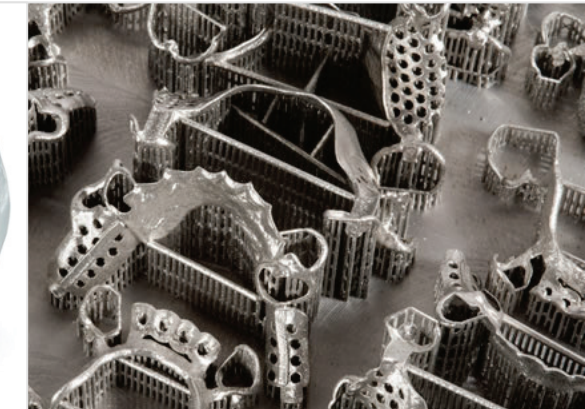
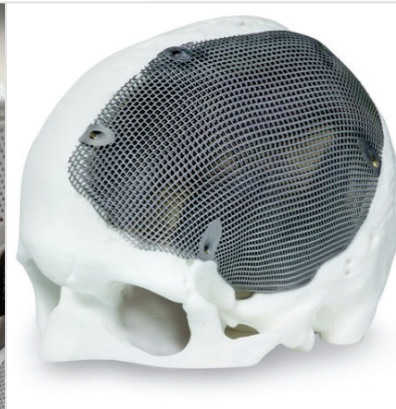


# DESIGN FÜR DIE ADDITIVE FERTIGUNG



Wintersemester 2021/22



## GLIEDERUNG

1. **Motivation (I): Einführung in das Thema Fertigung und Fertigungsplanung**
2. **Motivation (II): Konstruktionsrichtlinien / -möglichkeiten**

# AGENDA

1. Einleitung/Konstruktionsgrundlagen 3D-CAD
2. Grundlagen der Gestaltung unter Berücksichtigung der Besonderheiten additiver Fertigungsverfahren
3. Verfahrensübergreifende Empfehlungen
4. Konstruktionsempfehlungen für spezielle Verfahrensgruppen
  - FDM/FFF
  - Lasersintern
  - Laserstrahlschmelzen
  - EBM
5. Neue Konstruktionsansätze
  - Potentiale
  - Gitterstrukturen
  - Topologieoptimierung
  - Multi-Material Design
  - Form follows function
  - Funktionsintegrierter Leichtbau
  - Herausforderungen
6. Zusammenfassung

# Zielstellung Vorlesungseinheit

Verständnis für Randbedingungen der AM schaffen

- Neue Freiräume
- Neue Grenzen

Sinnvollen Einsatz der AM ermöglichen

- Neue Ansätze aufzeigen
- Anwendungsbereiche erkennen
- Neuartige Bauteile für AM entwickeln

Werkzeuge darlegen

- Informationszugang
- Richtlinien
- Tools für Konstruktion
- Tools für Aufbereitung

# Begriffsdefinition

Es gelten die Begriffe nach VDI 3405 sowie die folgenden Begriffe:

<b>Baurichtung (Z):</b>	positive Richtung, in die der Aufbau des Bauteils schichtweise erfolgt
<b>Bauteilanordnung:</b>	Lage von simultan gefertigten Bauteilen im Bauraum (Anmerkung: Die Bauteilanordnung ist eine Kombination aus Bauteilorientierung und Bauteilposition.)
<b>Bauteilorientierung:</b>	Ausrichtung des Bauteils im Bauraum, die durch Drehen des Bauteils um die Koordinatenachsen des Bauteilkoordinatensystems verändert wird
<b>Bauteilposition:</b>	Platzierung des Bauteils im Bauraum, die durch Translation des Bauteils entlang der Koordinatenachsen des Maschinenkoordinatensystems verändert wird
<b>Curl-Effekt:</b>	durch thermischen Einfluss hervorgerufener Verzug
<b>Downskin-Fläche:</b>	(auch <i>Überhangfläche</i> , $D$ ) (Teil-)Fläche, deren Normalenvektor $\vec{n}$ in Bezug auf die Baurichtung Z negativ ist
<b>Downskin-Winkel:</b>	(auch <i>Überhangwinkel</i> , $\delta$ ) Winkel zwischen der Bauplattformebene und einer Downskin-Fläche, der Werte zwischen $0^\circ$ (parallel zur Bauplattform) und $90^\circ$ (senkrecht zur Bauplattform) annehmen kann
<b>Upskin-Fläche:</b>	(auch <i>Aufbaufläche</i> , $U$ ) (Teil-)Fläche, deren Normalenvektor $\vec{n}$ in Bezug auf die Baurichtung Z positiv ist
<b>Upskin-Winkel:</b>	(auch <i>Aufbauwinkel</i> , $u$ ) Winkel zwischen der Bauplattformebene und einer Upskin-Fläche, der Werte zwischen $0^\circ$ (parallel zur Bauplattform) und $90^\circ$ (senkrecht zur Bauplattform) annehmen kann

## Begriffsdefinition 2

**Downskin-Fläche:**

(auch *Überhangfläche*,  $D$ ) (Teil-)Fläche, deren Normalenvektor  $\vec{n}$  in Bezug auf die Baurichtung  $z$  negativ ist

**Downskin-Winkel:**

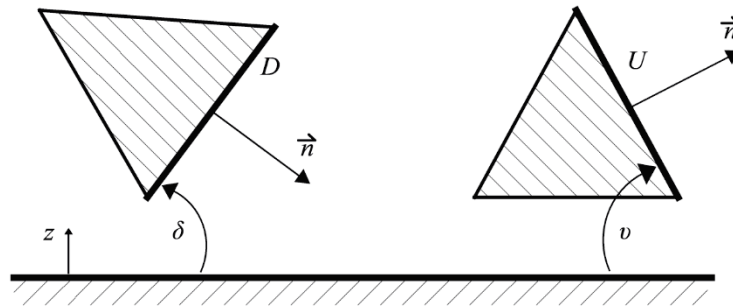
(auch *Überhangwinkel*,  $\delta$ ) Winkel zwischen der Bauplattformebene und einer Downskin-Fläche, der Werte zwischen  $0^\circ$  (parallel zur Bauplattform) und  $90^\circ$  (senkrecht zur Bauplattform) annehmen kann

**Upskin-Fläche:**  
Baurichtung

(auch *Aufbaufläche*,  $U$ ) (Teil-)Fläche, deren Normalenvektor  $\vec{n}$  in Bezug auf die  $z$  positiv ist

**Upskin-Winkel:**  
Fläche,

(auch *Aufbauwinkel*,  $\nu$ ) Winkel zwischen der Bauplattformebene und einer Upskin-Fläche, der Werte zwischen  $0^\circ$  (parallel zur Bauplattform) und  $90^\circ$  (senkrecht zur Bauplattform) annehmen kann



# Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
$a$	Überhang	mm
$D$	Downskin-Fläche	mm <sup>2</sup>
$Rz$	gemittelte Rautiefe	μm
$U$	Upskin-Fläche	mm <sup>2</sup>
$\delta$	Downskin-Winkel	°
$u$	Upskin-Winkel	°

## Abkürzungen

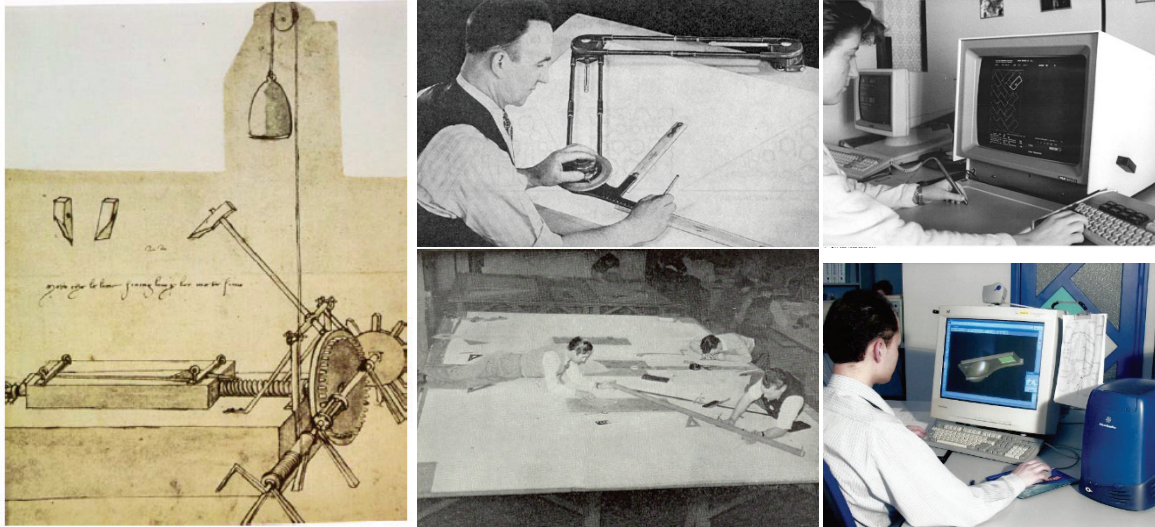
B	Bauteil
HIP	heiß-isostatisches Pressen (eng.: hot isostatic pressing)
I	Insel
PA	Polyamid
STL	Surface Tessellation Language

# Konstruktionsdefinition

**Konstruieren** heißt, den Entwurf eines technischen Produkts (Maschine, Anlage, Apparat, Gerät oder Bauwerk) so auszuarbeiten, dass seine Fertigung möglich wird. Arbeitsergebnis sind die zur Fertigung nötigen Unterlagen: Technische Zeichnungen, Montageanleitungen u.a.

**Integrierte Produktentwicklung (IPE)** ist ein moderner Ansatz des Konstruierens. Im Gegensatz zu anderen Konstruktionsmethodiken findet bei diesem Ansatz eine konsequente Betrachtung des gesamten Produktlebenszyklus statt (life-cycle Orientierung). Dies führt dazu, dass die Wechselwirkung zwischen Produkt und Prozess verstärkt betrachtet werden muss. D. h. der Produktentwickler muss eine ganzheitliche Denkweise verinnerlicht haben, durch die er nicht nur auf das zu erschaffende Produkt fixiert ist, sondern auch den Prozessen, die zu dessen Erzeugung, Instandhaltung und Vernichtung erforderlich sind, Beachtung schenkt. Das Ziel ist also ein möglichst optimales Produkt zu schaffen und gleichzeitig eine möglichst optimale Herstellung, Verwendung und Entsorgung zu gewährleisten.

# Konstruktion im CAD (2D/3D): Geschichte








# Aktuelle professionelle CAD Software

Siemens NX	Dassault SolidWorks	Autodesk Inventor	PTC Creo	Dassault CATIA
				

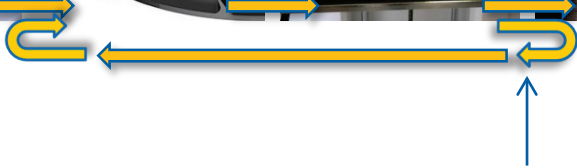
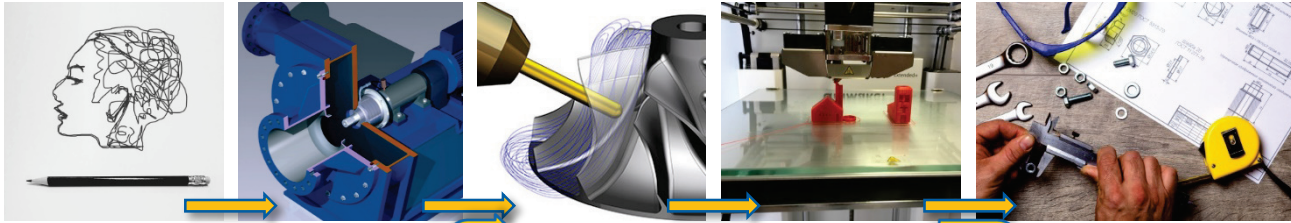
Viele Funktionen und Module integriert  
Komplexes Werkzeug von FE-Rechnung, Simulation, CAD, CAM bis zum Datenmanagement  
i.d.R. lokale Installationen

# Alternative CAD Software

Autodesk TinkerCAD	Google SketchUp	Autodesk Fusion 360	Autodesk Meshmixer	Autodesk Shapemaker
				
online	Make Gratis	Studenten 3 Jahre gratis	Gratis	Online

Meist vereinfachte oder spezialisierte Systeme  
 Teils zusätzliche Routen etablierter Anbieter  
 Auch als online/cloud-Lösungen vorhanden

# Prozesskette der Konstruktion Design-CAD-[CAM-XM]<sup>x</sup>-Messen/QC



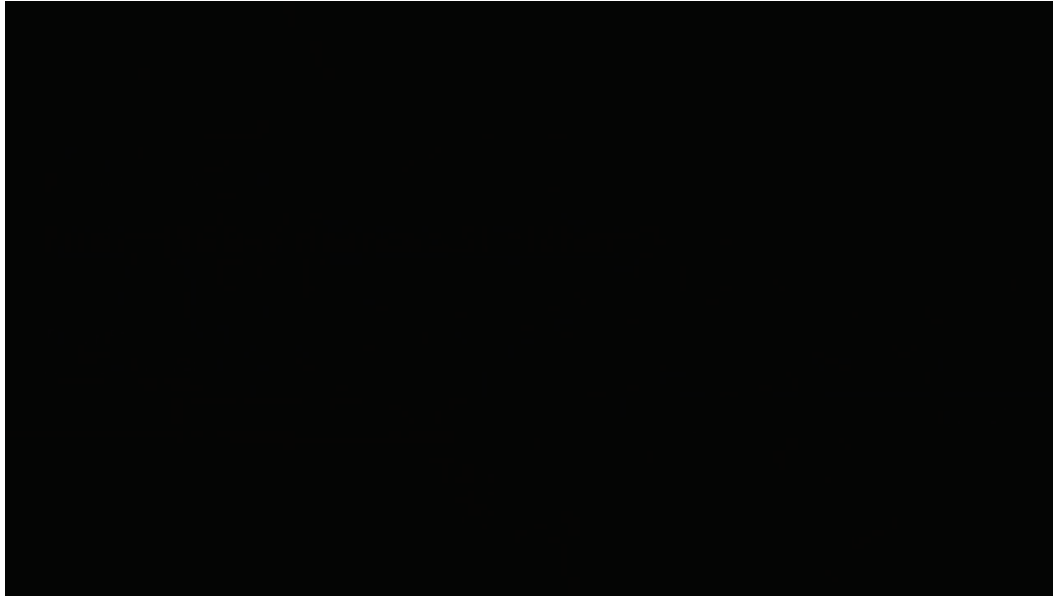
In der Regel zzgl. Finish  
bzw. weiterer Verfahren!

# Erstellen von Geometrien mit Scanner

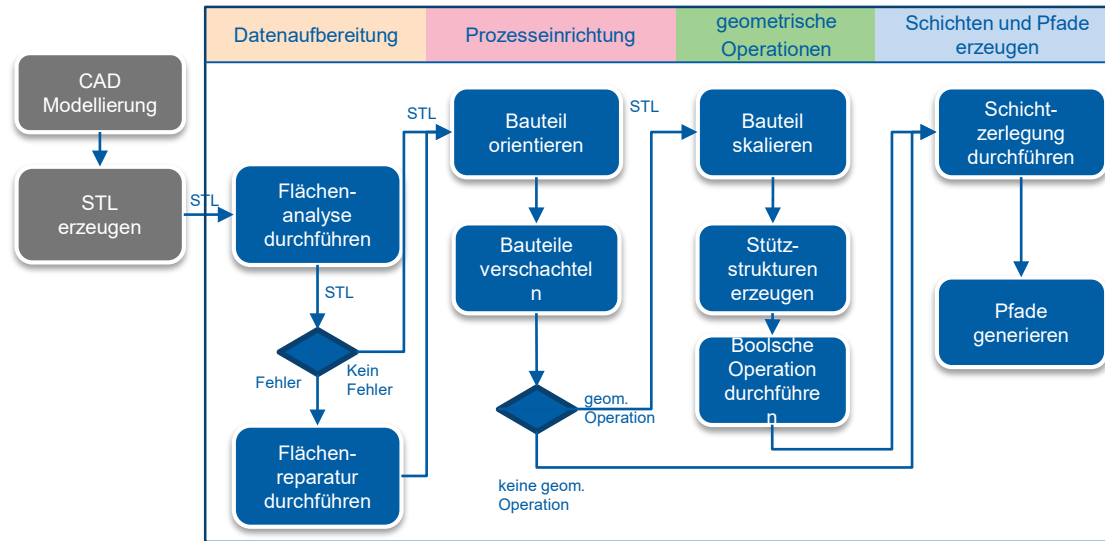
(Hinweis auf vorherige Vorlesung)



# CAD: Einführung: Tutorial Fusion 360



# Datentechnische Prozesskette



# Neutrale Schnittstellenformate

Kann das STL-Datenformat aufgrund eines fehlenden Schnittstellenmoduls nicht exportiert werden, können die Daten über Schnittstellenformate (z. B. IGES, STEP oder VDA-FS) an andere CAD-Programme übergeben werden, die dann ihrerseits eine STL-Ausgabe ermöglichen.

## Problematik:

Leistungsfähigkeit der Schnittstellen ist – trotz festgelegter Standards - sehr unterschiedlich  
Programme arbeiten mit unterschiedlichen Genauigkeiten (z. B. Akzeptanz des Flächenverbundes zweier Flächen zueinander)

→ Konvertierungsprobleme bei der Übertragung der Daten über systemneutrale Schnittstellen

# Datenvorbereitung 1

## STL - Exportparameter

Die Präzision der Bauteilgeometrie wird durch die Einstellung der Exportparameter bei der Ausgabe des STL Datensatzes bestimmt.

Eine zu grobe Auflösung beeinträchtigt die Genauigkeit und das Erscheinungsbild des Bauteils

Eine sehr hoch gewählte Auflösung benötigt viel Speicherplatz und eine erhöhte Bauvorbereitungszeit

Unterschiedliche Exportparameter können je nach System eingestellt werden:

- max. Dreiecksgröße / Kantenlänge / Sehnenhöhe
- Facettenabweichung / Oberflächenabweichung
- Winkelabweichung / Normalabweichung

# Datenvorbereitung 2

Die STL - Qualität bestimmt die Bauteilqualität durch

- die Dreiecksanzahl, Löcher, falsch orientierte Normalenvektoren, verschiedene gleichzeitig auftretende Fehler, sich schneidende und überlappende Dreiecke.

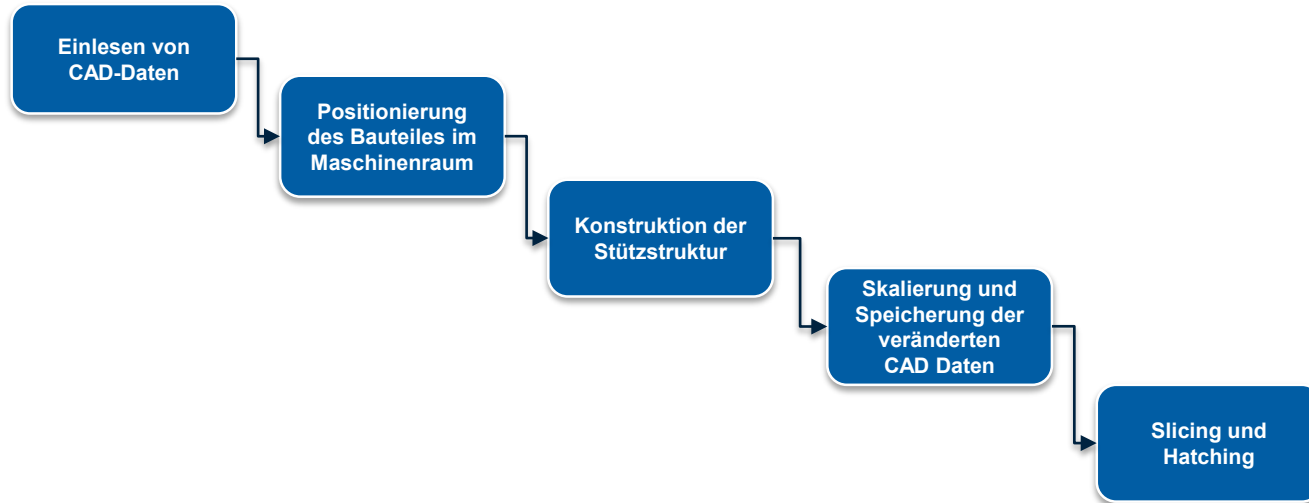
Besonderheiten bei der Datenvorbereitung:

- Bearbeitungszugaben: Je nach Bauteil oder gewähltem Verfahren kann sich an die additive Fertigung eine Nachbearbeitung anschließen. In dem Fall ist es erforderlich, bereits im CAD-Modell entsprechende Auf- oder Untermaße an den betroffenen Stellen vorzusehen.

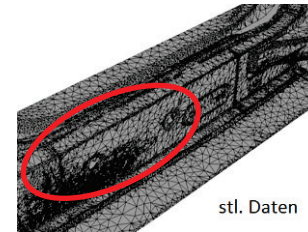
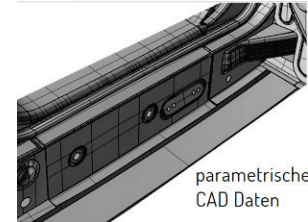
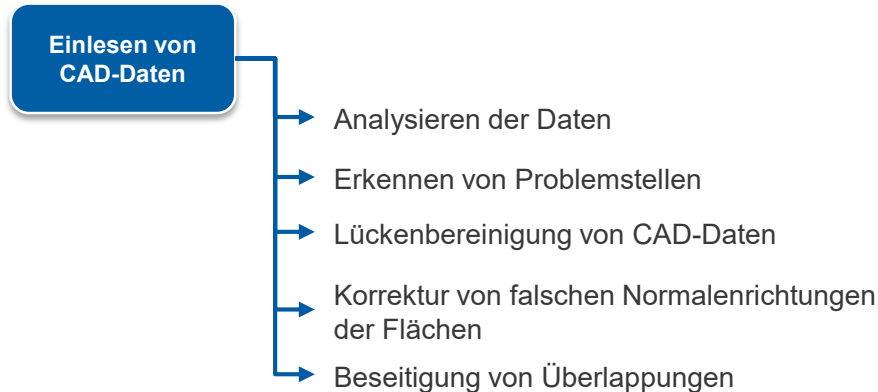
Volumenreduzierung (Massenreduktion)

- Die Fertigung großer Volumina durch AM kann bei einigen Verfahren sehr zeitaufwendig und kostenintensiv sein. Oftmals ist es jedoch möglich, das Volumen z. B. bei Werkzeugen bereits im CAD-Modell an den Stellen zu reduzieren, wo keine formgebenden Kavitäten erforderlich sind.

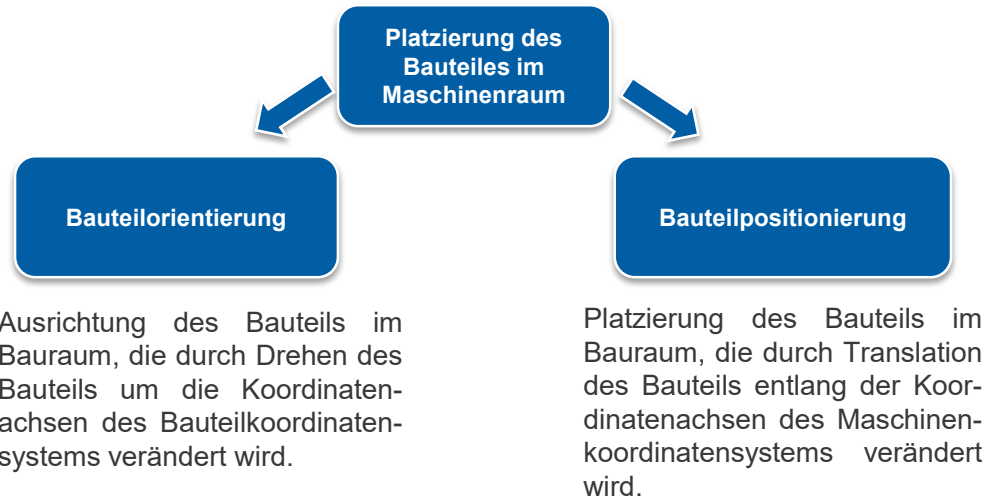
# Pre-Prozess: Konstruktive Aufbereitung von CAD-Daten



# Pre-Prozess: Konstruktive Aufbereitung von CAD-Daten



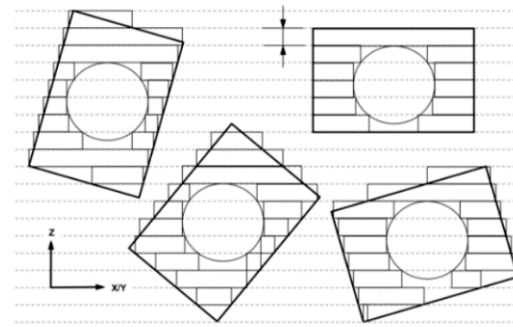
# Pre-Prozess: Konstruktive Aufbereitung von CAD-Daten



# Einflüsse der Bauteilorientierung

Effekte/Auswirkungen:

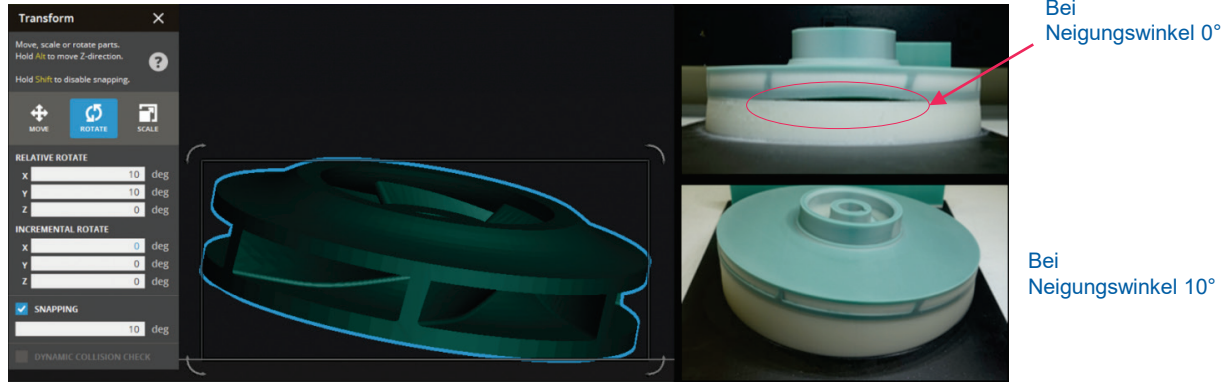
- Treppenstufeneffekt
- Aufrollen des Bauteiles (Curling)
- Oberflächenqualität
- Bauteilgenauigkeit
- mechanische Bauteileigenschaften
- Insel
- Überhang



# Einflüsse der Bauteilorientierung auf die Oberflächengüte



# Einflüsse der Bauteilorientierung auf die Bauteilqualität



Auf einem 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  $15^\circ$  nicht unterschritten werden, da sich sonst starke Stufen an der Bauteiloberfläche bilden.

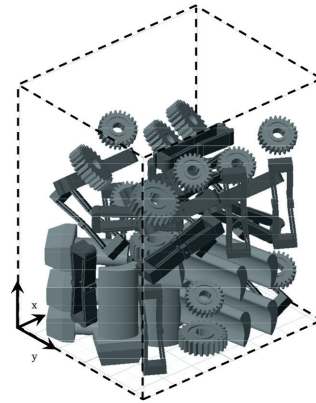
## Positiv für Teilequalität und Bauzeit:

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

# Einflüsse der Bauteilpositionierung

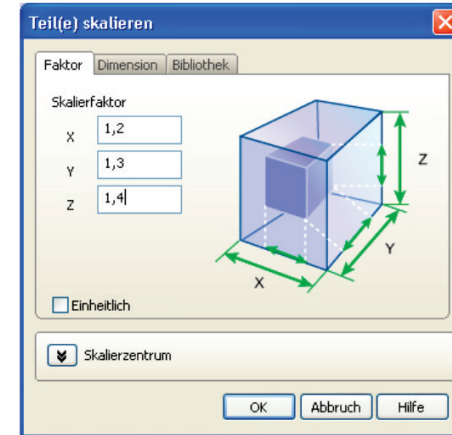
## Effekte:

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

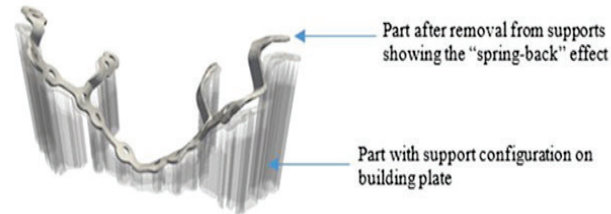
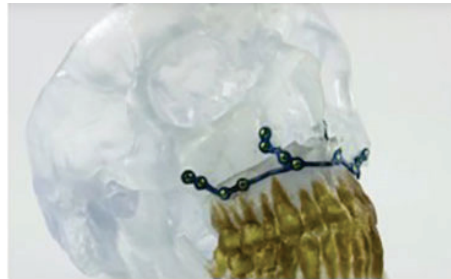


# Skalierung

- 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.



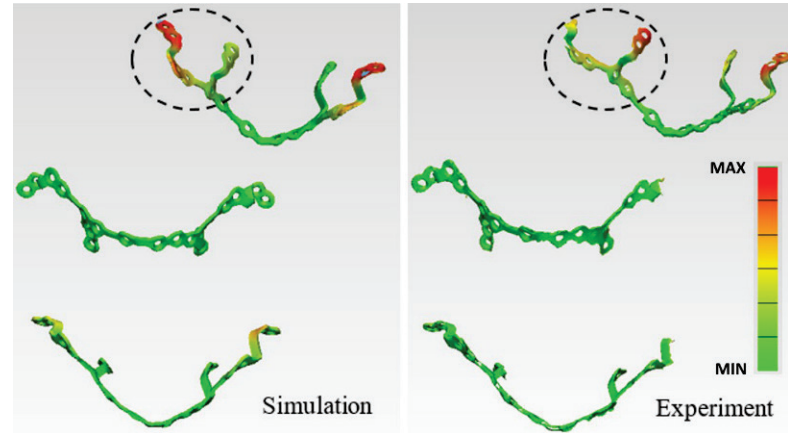
# Ein Beispiel aus dem Bereich der Medizintechnik



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

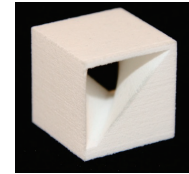
# Ein Beispiel aus dem Bereich der Medizintechnik

- 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).

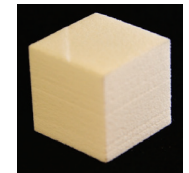


# Einfluss von Löchern auf die Bauteilqualität

Lage der Fehler	Auswirkungen
Loch auf einer Seite senkrecht zur Baurichtung.	Kein Fehler
Löcher auf zwei Seiten senkrecht zur Baurichtung.	Loch im Bauteil durch Verbindung der Löcher
Loch auf einer Seite parallel zur Baurichtung.	Kein Fehler
Löcher auf zwei Seiten parallel zur Baurichtung.	Oberflächenfehler unten
1 Seite senkrecht zur Baurichtung fehlt.	Kein Fehler
2 Seite senkrecht zur Baurichtung fehlen.	Totalverlust
1 Seite parallel zur Baurichtung fehlt.	Kein Fehler
2 Seiten parallel zur Baurichtung fehlen.	Kein Fehler



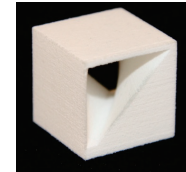
Verbindung gegenüberliegender Löcher



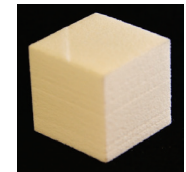
Oberflächenfehler

# Einfluss von falsch orientierten Normalenvektoren

Lage der Fehler	Auswirkungen
Einige Dreiecke einer Seite senkrecht zur Baurichtung sind falsch orientiert.	Kein Fehler
Einige Dreiecke zweier Seiten senkrecht zur Baurichtung sind falsch orientiert.	Loch im Bauteil durch Verbindung der Löcher
Einige Dreiecke einer Seite parallel zur Baurichtung sind falsch orientiert.	Oberflächenfehler an der Seite mit invertierter Normale
Einige Dreiecke zweier Seiten parallel zur Baurichtung sind falsch orientiert.	Oberflächenfehler an beiden Seiten mit invertierten Normalen
2 Seiten senkrecht zur Baurichtung sind falsch orientiert.	Kein Fehler
2 Seiten parallel zur Baurichtung sind falsch orientiert.	Kein Fehler



Verbindung gegenüberliegender Löcher

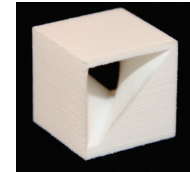


Oberflächenfehler

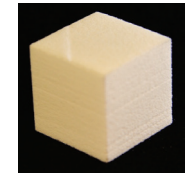
# Einfluss von verschiedenen Fehlern

Lage der Fehler	Auswirkungen
Loch und invertierte Normalen an gegenüberliegenden Seiten senkrecht zur Baurichtung.	Loch im Bauteil durch Verbindung der Löcher
Loch und invertierte Normalen an gegenüberliegenden Seiten parallel zur Baurichtung.	Oberflächenfehler an der Seite mit invertierter Normale

Dagegen ergeben sich durch überlappende und sich schneidende Dreiecke meist keine Fehler bei der Bauteilgenerierung und die Geometrie wird richtig wiedergegeben.

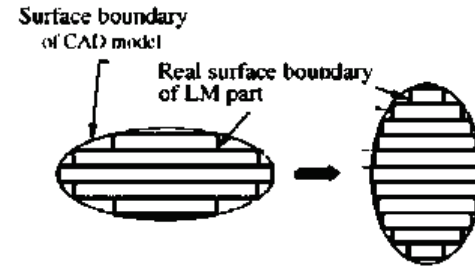
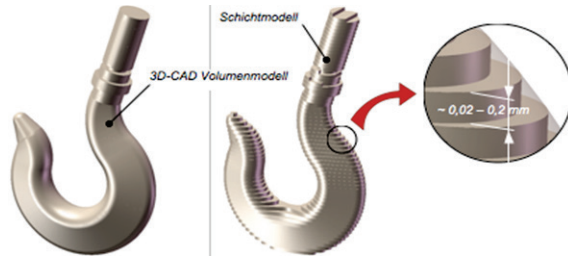
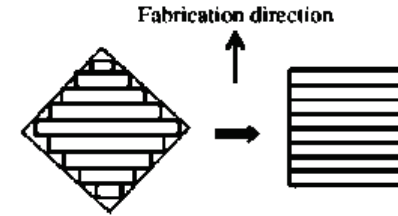
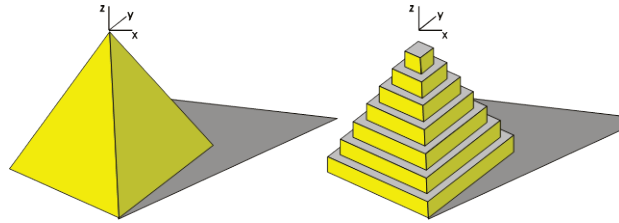


Verbindung gegenüberliegender Löcher



Oberflächenfehler

# Slicen



# Verbreitete Slicer-/Präparations-Software

Cura



Slic3r



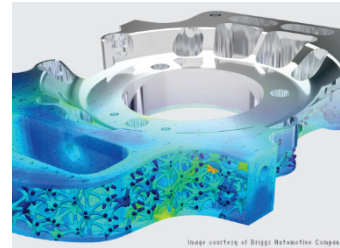
Magics



NetFabb



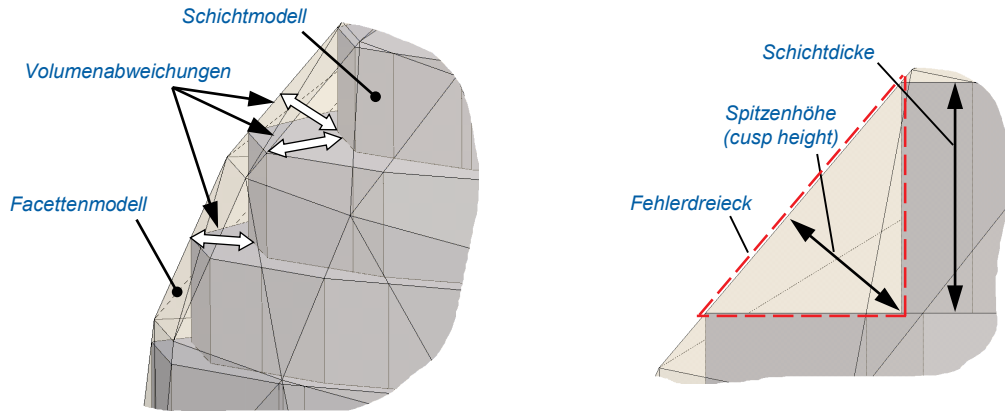
Supporterstellung (netfabb)



Interne Füllstrukturen (netfabb/Briggs)

## Quantifizierung des durch den Stufeneffekt auftretenden Fehlers

Die Volumendifferenz zwischen Facetten- (STL) und Schichtmodell und Fehlerdreiecke und die dazugehörige Spitzenhöhe (engl. cusp height)



Beschreibung der Spitzenhöhe:

$$c = \sqrt{D_s^2 \cdot (1 - \sin^2 \alpha)}$$

# 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.

# 2,5D Schichtrepräsentationen

Standardformat zum Austausch von Schichtdaten zwischen der Jobvorbereitungssoftware und der Prozesssteuerung  
Kann mehrere Modelle enthalten, die durch offene und geschlossene Polygone und Schraffurlinien beschrieben werden können  
Querschnitte gekrümmter Flächen können nur approximativ wiedergegeben werden  
Enthält nur die einzelnen 2D-Schichtinformationen

Offenes Schnittstellenformat

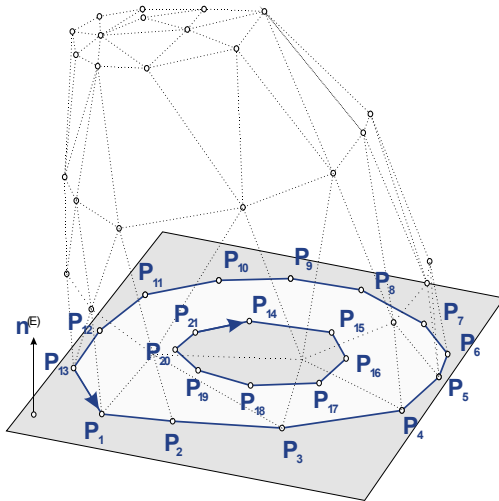
- CLI - (Common Layer Interface)

Anlagenspezifische Schnittstellenformate

- ABF - Arcam Build Files
- CLS - Concept Laser Slice Files
- SSL - Stratasys Layer File
- USF - Universal Slice Files
- SLC - Format *Slicing Contour* Format

# Struktur einer CLI-Datei

Flexibles, anlagenneutrales Datenformat;  
Beschreibung der Geometrie durch die Summe  
der aufsteigenden Schichten



**\$\$HEADERSTART**  
**\$\$ASCII**  
**\$\$UNITS/0.001**  
**\$\$HEADEREND**

Beginn der Kopfzeile  
Definition des Dateiformats  
Definition der Einheiten  
Ende der Kopfzeile

**\$\$GEOMETRYSTART**  
**\$\$LAYER/15.6**

Beginn der Geometry-Sektion  
Aktuelle Schicht

**\$\$POLYLINE/1, 0, 1, P<sub>1\_x</sub>, P<sub>1\_y</sub>, P<sub>2\_x</sub>, P<sub>2\_y</sub>,**  
**\$\$POLYLINE/1, 0, 1, P<sub>2\_x</sub>, P<sub>2\_y</sub>, P<sub>3\_x</sub>, P<sub>3\_y</sub>,**

Polylinie der Außenkontur  
Polylinie der Außenkontur

...

**\$\$POLYLINE/1, 0, 1, P<sub>11\_x</sub>, P<sub>11\_y</sub>, P<sub>12\_x</sub>, P<sub>12\_y</sub>,**  
**\$\$POLYLINE/1, 0, 1, P<sub>12\_x</sub>, P<sub>12\_y</sub>, P<sub>13\_x</sub>, P<sub>13\_y</sub>,**  
**\$\$POLYLINE/1, 0, 2, P<sub>14\_x</sub>, P<sub>14\_y</sub>, P<sub>15\_x</sub>, P<sub>15\_y</sub>,**  
**\$\$POLYLINE/1, 0, 2, P<sub>15\_x</sub>, P<sub>15\_y</sub>, P<sub>16\_x</sub>, P<sub>16\_y</sub>,**

Polylinie der Außenkontur  
Polylinie der Außenkontur  
Polylinie der Innenkontur  
Polylinie der Innenkontur

...

**\$\$POLYLINE/1, 0, 2, P<sub>19\_x</sub>, P<sub>19\_y</sub>, P<sub>20\_x</sub>, P<sub>20\_y</sub>,**  
**\$\$POLYLINE/1, 0, 2, P<sub>20\_x</sub>, P<sub>20\_y</sub>, P<sub>21\_x</sub>, P<sub>21\_y</sub>,**

Polylinie der Innenkontur  
Polylinie der Innenkontur

**\$\$LAYER/15.7**

Folgende Schicht

...

**\$\$GEOMETRYEND**

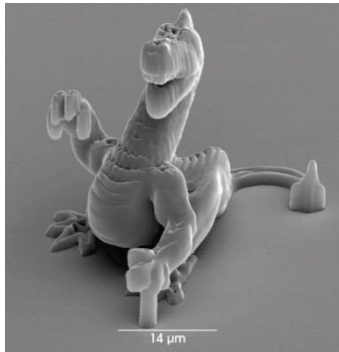
Ende der Geometry-Sektion

# Grundlagen der Gestaltung unter Berücksichtigung der Besonderheiten additiver Fertigungsverfahren

**„Vergiss alles, was du gelernt hast!“**

# Bandbreite der Verfahren

2-Photonen-Polymerisation



concrete-paste deposition



Quelle: LZH, WINSUN

# Geometrische Auflösung des AM Verfahrens

Abhängig von

- Verfahrensprinzip (z.B. Pulverbett -> Korngröße)
- Maschine (z.B. FFF -> Düsendurchmesser, Achspräzision, SLM -> Laserspot Durchmesser)

Einfluss auf

- Minimale Wandstärken (X/Y und Z -> nicht gleich, Ausrichtung!)
- Gängige Wandstärken -> Ganzzahlige Vielzahl von Spurbreiten
- Treppenstufeneffekt
- Erreichbare Genauigkeit in Geometrie (makro) und Oberfläche (mikro)

# Materialeigenschaften / Stabilität

Konsistenz des Ausgangsmaterials:

Pulver -> Korngröße und -verteilung, Rundheit

Fasern -> Form, Länge, Verteilung, Verästelung

Harz -> Viskosität, Alterungszustand

Festigkeit des Materials nach der Additiven Fertigung ->

Einfluss der Eigenschaften des Ausgangsmaterials **und** des Prozesses

Sintern

Schmelzen/Erstarren

Binden durch Zusatzwerkstoff (Binder)

Polymerisieren

Einfluss auf minimal zulässige Wandstärken, Gestaltung von Hohlräumen, Skalierung,...

# Interne Bereiche

STL -> *Surface* Tessellation Language -> nur Oberflächeninformationen werden verarbeitet

Kontur wird abgefahren (Belichtungsstrategie 1)

Interne Bereiche werden aufgefüllt (Belichtungsstrategie 2) -> verschiedenste ‚hatch‘ Strategien möglich

Wahl der hatch-Muster entscheidet mit über

- Stabilität
- Gewicht
- Baujob-Dauer
- Materialnutzung

des Bauteils

Kontur				
	Standard	OnPart	Downskin	
Geschwindigkeit:	3000.0 mm/s	3000.0 mm/s	3000.0 mm/s	<input checked="" type="checkbox"/> Kontur
Leistung:	0.0 W	0.0 W	0.0 W	<input checked="" type="checkbox"/> Kontur nach Füllung
Strahlverschiebung:	0.000 mm			
Dicke:	0.120 mm			
		Korridor	0.660 mm	

OK   Abbrechen   Übernehmen

Füllung	
Abstand:	0.30 mm
Geschwindigkeit:	4500.0 mm/s
Leistung:	0.0 W
Strahlverschiebung:	0.120 mm <input checked="" type="checkbox"/> Skywriting
Fillen:	<input checked="" type="checkbox"/> X <input checked="" type="checkbox"/> Y <input checked="" type="checkbox"/> Alternierend

OK   Abbrechen   Übernehmen

# Weiterentwicklung von Softwarelösungen

## Beispiel Core Technologies:

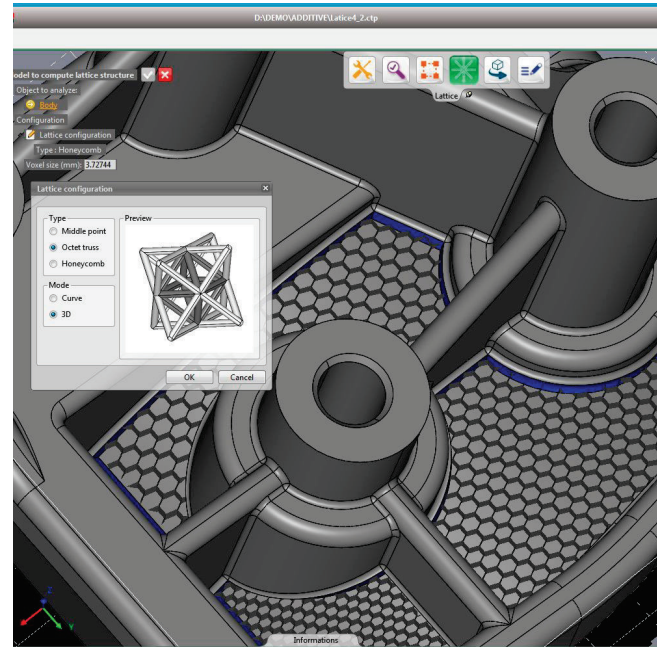
Es können Stützstrukturen zur Fertigung sowie Lattice-Geometrien für den Leichtbau und Materialeinsparungen erzeugt werden.

Die CAD-Modelle sind als intelligente B-Rep Geometrie durch robuste Direct-Modelling-Funktionen bearbeitbar, was deutliche Vorteile gegenüber der Bearbeitung tessellierter Modelle hat.

Durch frei wählbare Slicing-Parameter werden die Rauigkeiten angezeigt und die Bauteile können vom System automatisch so positioniert werden, dass ausgewählte Bereiche die bestmögliche Oberfläche aufweisen.

In der Datenbank sind gängige Maschinentypen mit ihren Bauräumen hinterlegt. Durch intelligente Nesting-Funktionen wird die schnelle, einfache Füllung zur optimalen Ausnutzung des Bauraums und somit höchste Effizienz sichergestellt.

Die Healing-Funktionen des Systems sorgen für bestmögliche Datenqualität der konvertierten und für den 3D-Druck optimierten Modelle, die im amf-, 3mf- sowie stl-Format abgespeichert werden können.



# Einschränkungen durch Pulver/Harz/Filament

Konstruktionsoptionen sind teils eingeschränkt durch Material und Bauprozess:

Entfernbarkeit des das Bauteil umgebenden Materials

- Interne Hohlräume im Pulver-/Harzbett: Auslauf nach Rieselfähigkeit/Viskosität definieren
- Tiefe Kavitäten und lange Kanäle: ist Restpulver entfernbar? Ggf. Druckluft/Ultraschall prüfen

Entfernbarkeit der Supportstrukturen

- Zugänglichkeit
- Mechanische Festigkeit Supportanbindung vs. mechanische Festigkeit des Bauteilfeatures

# Complexity for free

Andere Herangehensweise als im konventionellen Konstruieren notwendig

- die geometrisch einfachste Form ist nicht immer die am Besten herstellbare.

„Beliebig komplex“ ist allerdings auch Trugschluss

- Schichtweiser Aufbau bringt ebenfalls Einschränkungen mit sich.
- Konturlänge ist oft proportional zu Baujob-Dauer
- Supportstrukturen müssen auch gefertigt werden -> Zeit+Kosten

# Schichten/anisotrope Eigenschaften

Schichtweiser Aufbau führt zu richtungsabhängigen Eigenschaften  
Zugfestigkeit in Baurichtung ist i.d.R. deutlich geringer als in Bauebene  
Druckfestigkeit ist in Baurichtung höher als in Bauebene

Stark abhängig vom AM-Verfahren: Verfestigungsmechanismus spielt entscheidende Rolle

- SLA, SLS, SLM, EBM: nahezu isotrope Eigenschaften
- FDM/FFF, 3DP: stark anisotrope Eigenschaften

Kraftfluss bei Konstruktion berücksichtigen

- Auch ggf. nötige Nachbearbeitung einbeziehen (Kraftrichtung kann anders sein)

# Support-/Stützstrukturen

Ab gewissem verfahrensspezifischen Überhang-Winkel ist Support notwendig

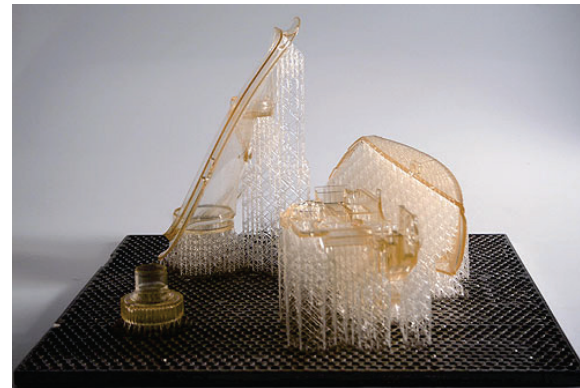
- Z.B. Voronoi-Algorithmen zum support-freien Design nutzbar

Notwendigkeit des Supports hängt ab von

- Konstruktiver Gestaltung des Bauteils
- Platzierung/Ausrichtung im Bauraum
- AM-Verfahren (z.B. Möglichkeit des Stützens des Pulverbettes betrachten)

Support muss i.d.R. nach dem Bauen entfernt werden

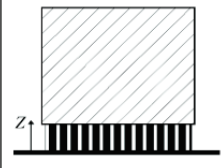
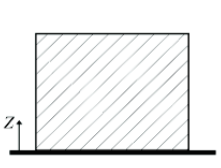
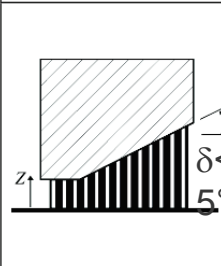
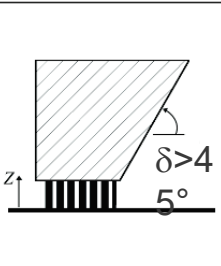
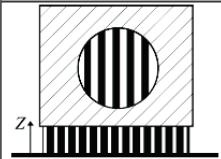
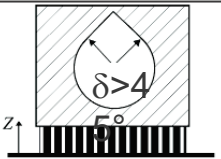
- Manuell (SLM, EBM, SLA...)
- Chemisch/halbautomatisiert (FDM/FFF)



# Konstruktion der Stützstruktur

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

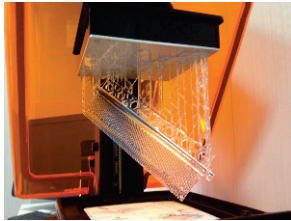
# Hinweise zur Anwendung von Stützkonstruktionen

		<p>links: Anbindung des Bauteils auf der Bauplatte mit Stützkonstruktionen</p> <p>rechts: direkte Anbindung des Bauteils auf der Bauplatte ohne Stützkonstruktionen.</p>
		<p>links: Flächen mit Downskin-Winkel <math>\delta &lt; 45^\circ</math><sup>a)</sup> benötigen üblicherweise Stützkonstruktionen.</p> <p>rechts: Flächen mit Downskin-Winkel <math>\delta &gt; 45^\circ</math><sup>a)</sup> benötigen üblicherweise kein Stützkonstruktionen. Winkelabhängige Beeinträchtigungen der Oberflächenqualität können auftreten.</p>
		<p>links: Bohrung mit enthaltener Stützstruktur</p> <p>rechts: Bohrung mit angepasster Form zur Vermeidung von Stützstrukturen nach.</p>

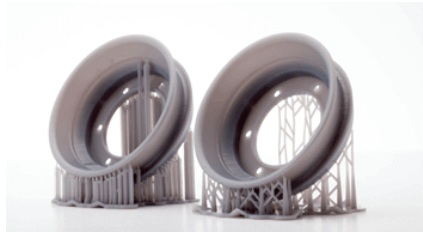
<sup>a)</sup> abhängig von Material und Prozess / subject to material and process

# Konstruktionsbeispiele der Stützstruktur

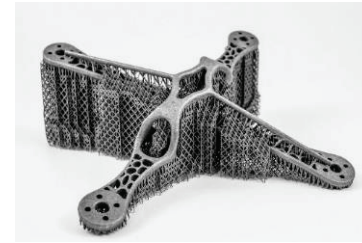
Photopolymer



Kunststoff

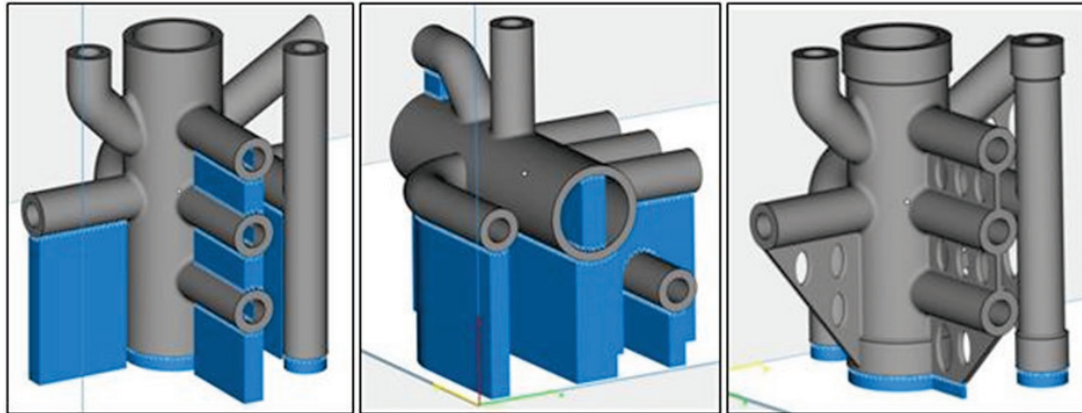


Metall



Konstruktion der Stützstruktur hängt stark von verwendeten Werkstoffen, AM-Verfahren und Anforderungen an Fertigteileparameter 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.

# Oberflächengestalt

Oberflächenausprägung ist stark abhängig von

- AM-Verfahren / Prinzip (Pulver, Filament, Harz)
- Prozessparametern (Energie, Düsendurchmesser, Schichtdicke)
- Platzierung/Ausrichtung des Bauteils im Bauraum

Bei speziellen Anforderungen an lokale Oberflächeneigenschaften

- Anordnung in Konstruktion sinnvoll wählen, wenn möglich (z.B. in einer Ebene)
- AM-Verfahren entsprechend wählen, wenn materialeitig möglich
- Nachbearbeitung (z.B. überfräsen) einplanen

Bei Nachbearbeitung:

- Aufmaß beachten
- Zugänglichkeit der Oberfläche für Nachbearbeitungsprozesse gewährleisten
- Kräfte und Richtung des Nachbearbeitungsprozesses in Konstruktion beachten
- Spannmöglichkeiten (z.B. Verstärkungen, Referenzflächen) integrieren

# Risse/scharfe Kanten und Winkel

Beanspruchungsregime im Einsatzfall beachten

- Spitze Winkel vermeiden -> ggf. Verrundungen einfügen

Minimale Abstände zwischen Volumen (Spalte) am Prozess orientieren (Auflösung, Entfernbare Restmaterial)

Treppeneffekt beachten



# Verfahrensübergreifende Empfehlungen



# Verfahrenstypische Vorteile

Die additiven Fertigungsverfahren können vorteilhaft eingesetzt werden, wenn die folgenden Punkte relevant für das Bauteil sind:

Bauteile lassen sich endkonturnah in einem Prozessschritt werkzeuglos fertigen.

Die Freiheitsgrade der Gestaltung von Bauteilen sind typischerweise hoch. Fertigungstechnische Restriktionen konventioneller Verfahren entfallen üblicherweise, z. B. für:

- Werkzeugzugänglichkeit
- Hinterschnitte

Es lässt sich eine große Bandbreite an komplexen Geometrien herstellen, wie:

- Freiformgeometrien, z. B. bionische Strukturen
- topologisch optimierte Strukturen
- filigrane Strukturen, z. B. Waben-, Sandwich- und Gitterstrukturen

Der Grad der Bauteilkomplexität ist weitgehend unabhängig von den Fertigungskosten.

Die Funktionalität von Bauteilen kann durch Nutzung der Gestaltungsfreiheit erhöht werden.

Montage- und Fügevorgänge können durch Integralbauweise reduziert werden.

Bauteileigenschaften können lokal durch Einstellung der Prozessparameter gezielt angepasst werden.

# Verfahrenstypische Nachteile

Bedingt durch den additiven Fertigungsprozess gibt es verfahrenstypische Nachteile, die bei der Produktgestaltung zu berücksichtigen sind:

Es können Schrumpfungen, Eigenspannungen oder Verformungen durch lokale Temperaturunterschiede entstehen.

Die Oberflächengüte von additiv gefertigten Bauteilen wird typischerweise durch den schichtweise erfolgenden Aufbau beeinflusst (Treppenstufeneffekt). In Abhängigkeit vom Anwendungsfall ist Nachbearbeitung erforderlich.

Die Abweichungen der Maßhaltigkeit, der Form- und der Lagegenauigkeit von additiv gefertigten Bauteilen sind zu beachten. Für Funktionsflächen muss daher gegebenenfalls ein Aufmaß zur Nachbearbeitung vorgesehen werden. Erforderliche geometrische Genauigkeiten können durch eine gezielte Nachbearbeitung eingestellt werden .

Bei der Bauteilauslegung sind anisotrope Eigenschaften zu berücksichtigen, die durch den schichtweise erfolgenden Aufbau typischerweise auftreten können.

Nicht alle für konventionelle Verfahren verfügbare Konstruktionswerkstoffe sind bislang für additive Fertigungsverfahren verwendbar.

# Allgemeingültige Randbedingungen

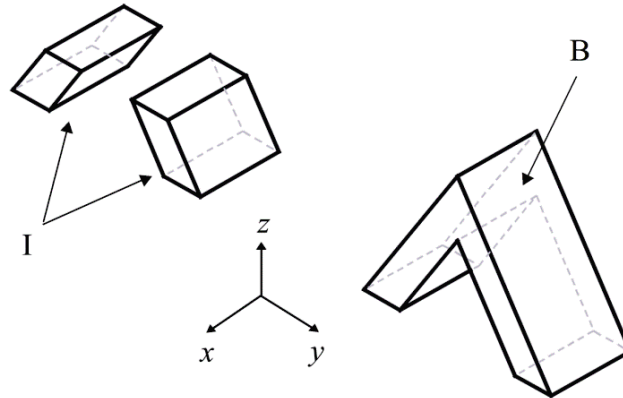
Aufgrund des **schichtweise erfolgenden Aufbaus** kann es bei additiven Verfahren geometriebedingt während des Bauprozesses zu **nicht ausreichender Anbindung** von einzelnen Sektionen eines Bauteils kommen.

Diesbezüglich können die folgenden Fälle als **kritisch** identifiziert werden (ff).

# Insel

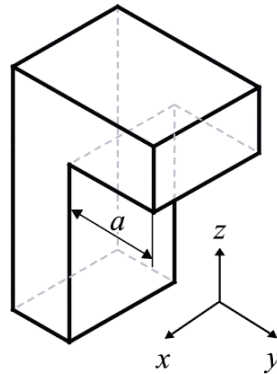
Inseln ( $I$ ) sind Elemente, die erst im späteren Verlauf des Bauprozesses zu einem Bauteil  $B$  verbunden werden. Dies ist bei der Bauteilgestaltung zu berücksichtigen. Bauteile, die in ihrer gesamten Gestalt stabil sind, können so während des Bauprozesses einen instabilen Zustand einnehmen (Bild).

Inseln sind unter Umständen nicht gegen mechanische Belastungen im Pulverauftragsprozess geschützt. Das kann zu Deformationen der Inseln führen.



# Überhang

Bei Downskin-Flächen mit einem Downskin-Winkel von  $0^\circ$  ergibt sich ein Überhang mit der Länge  $a$  (Bild).  
Bei kleinen Überhängen ist z. B. keine Zusatzgeometrie in der Form von Stützkonstruktionen notwendig.  
Hier trägt sich der auskragende Bereich während der Fertigung selber.  
Die zulässigen Werte für  $a$  sind prozessabhängig.

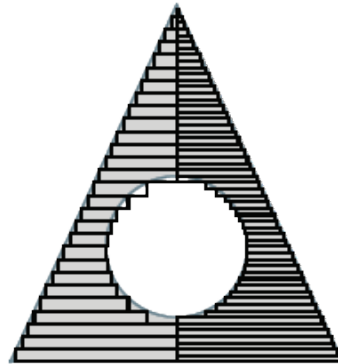


# Treppenstufeneffekt

Bedingt durch die schichtweise erfolgende Fertigung wird die 3-D-Geometrie des Bauteils vor der Fertigung in eine 2,5-D-Darstellung überführt.

Der resultierende Fehler durch die Abweichung dieser 2,5-D-Darstellung von der ursprünglichen Geometrie wird als Treppenstufeneffekt bezeichnet.

Der Treppenstufeneffekt wird maßgeblich durch die Schichtdicke beeinflusst (Bild).



# Maß-, Form- und Lagegenauigkeiten

In Abhängigkeit von Verfahren, Material und Fertigungsparametern können die Bauteile in unterschiedlicher Genauigkeit gefertigt werden.

Typischerweise sind keine Genauigkeiten erreichbar, die mit konventionellen werkzeuggebundenen Fertigungsverfahren erreicht werden können.

Anforderungsabhängig müssen daher Aufmaße für eine werkzeuggebundene Nachbearbeitung vorgesehen werden.

Hierbei muss insbesondere berücksichtigt werden, dass je nach Bauteilorientierung unterschiedliche Genauigkeiten erreicht werden können.

Beispielsweise kann es durch den Aufbau in Schichten zu richtungsabhängigen Schrumpfungen des Bauteils kommen.

# Datenqualität, Auflösung, Darstellung

Basis der additiven Technologien sind 3-D-CAD-Daten. Als Datenaustauschformat hat sich das STL-Datenformat (Surface Tessellation Language) als Quasi-Industriestandard etabliert.

- STL-Dateien beschreiben die Oberfläche eines Bauteils als Netz aus Dreiecken. Dabei werden die Eckpunkte der Dreiecke nach der Rechte-Hand-Regel sowie der jeweilige Normalenvektor erfasst.

Da gekrümmte Bauteilflächen durch Dreiecke angenähert werden, bestimmt die gewählte Auflösung bei der Generierung der STL-Datei die Geometriequalität des zu fertigenden Bauteils.

- Bei zu grober Auflösung werden die in den STL-Daten definierten Dreieckskanten auf der gefertigten Teileoberfläche sichtbar.
- Zu hoch aufgelöste STL-Daten beanspruchen viel Speicherplatz und verlangsamen den Datentransfer und die Verarbeitung durch prozessvorbereitende Software.

Die Auflösung wird in der Regel durch den Parameter „Sehnenhöhe“ beeinflusst.

- Dieser Parameter beschreibt den maximalen Wert, den ein Punkt auf der Bauteiloberfläche von dem erzeugten Dreieck abweichen darf.
- Je kleiner die angegebene Sehnenhöhe, desto geringer ist daher die Abweichung von der tatsächlichen Bauteiloberfläche. Empfohlen wird hier eine Einstellungen von 0,01 mm bis 0,02 mm.

Weitere Parameter stehen systemabhängig zur Einstellung der Vernetzungsgenauigkeit zur Verfügung. Da STL-Daten keine Informationen zu dem verwendeten Einheitensystem übergeben, ist unbedingt darauf zu achten, diese Information auf anderem Weg zu übergeben. Selbiges gilt für weitere Metadaten. Um Unsicherheiten auszuschließen, sollte die Maßeinheit im Modell immer Millimeter sein.



Design für die Additive Fertigung

# Design für die Additive Fertigung 2021 - 03

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



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