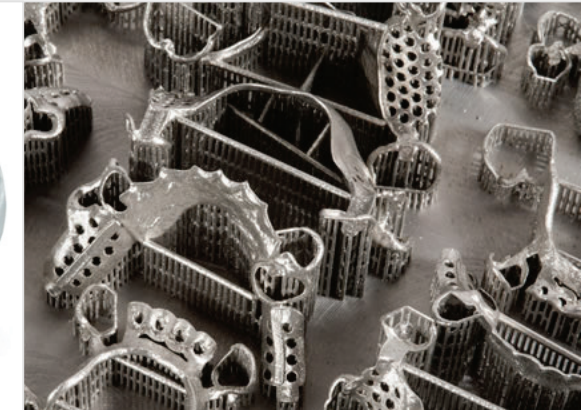
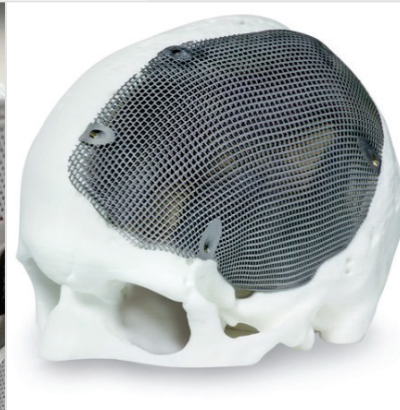


# DESIGN FÜR DIE ADDITIVE FERTIGUNG



Wintersemester 2021/22

## INFORMATIONEN ZUR VORLESUNG

Angesiedelt an der Professur für Additive Fertigung am IMKF

Informationen zur Professur und dem Institut unter: <http://tu-freiberg.de/fakult4/imkf>

Lehrinformationen, Einschreibung und Dokumente im **OPAL**:

*OPAL > Technische Universität Bergakademie Freiberg > 04\_Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik > Institut für Maschinenelemente, Konstruktion und Fertigung > Professur für Additive Fertigung > Studienjahr 2021/2022 > Design für die Additive Fertigung WS 2021/2022*

Lehrender: Prof. Dr.-Ing. Henning Zeidler

Raum: KKB 90

Mail: [henning.zeidler@imkf.tu-freiberg.de](mailto:henning.zeidler@imkf.tu-freiberg.de)





Design für die Additive Fertigung

## MODUL DESIGN FÜR DIE ADDITIVE FERTIGUNG

Vorlesung: Prof. Dr.-Ing. H. Zeidler 2 SWS -> KA

Übung: Prof. Dr.-Ing. H. Zeidler 1 SWS

Endnote = Prüfungsnote

Kontakt für Rückfragen: Prof. Dr.-Ing. H. Zeidler

Tel.: 39 3066; [henning.zeidler@imkf.tu-freiberg.de](mailto:henning.zeidler@imkf.tu-freiberg.de); KKB Zimmer 90



Design für die Additive Fertigung

## ORGANISATORISCHES

Vorlesung: DO 14:00-15:30, MET-0016

Übung: DI 11:30-13:00, RAM-2220 in der geraden Woche

Bitte unbedingt für diese  
Veranstaltungen (V) im OPAL  
einschreiben!

## ORGANISATORISCHES III

### Skripte

- Bereitstellung der Vorlesungsfolien als Hörsaalversion auf OPAL
- Format: PDF

### Aufbau

- **Wichtung** der Folie am oberen Rand:
  - 1: Prüfungsrelevantes Kernwissen
  - 2: Prüfungsrelevantes Ergänzungswissen
  - 3: Exkurs/Zusatzinformationen/Add-on



Warum Fertigungstechnik?

2

**BEISPIEL: GETRIEBE / ZAHNRAD**

- Um Produkte und Bauteile herzustellen, benötigt man Fertigungsverfahren
- I.d.R. werden mehrere Verfahren eingesetzt, um ein Bauteil zu fertigen
- Die Auswahl der Verfahren richtet sich u. a. nach **Material** und dessen Eigenschaften und Ausgangsform, zu erzeugender **Form**, Anforderung an **Oberflächen**, **Stückzahl**, **Kosten**
- Die Einteilung und Beschreibung der Verfahren erfolgt in einer Norm (z.B. DIN 8580)







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

12

# LITERATUREMPFEHLUNGEN

1. Klahn, Christoph: Entwicklung und Konstruktion für die additive Fertigung: Grundlagen und Methoden für den Einsatz in industriellen Endkundenprodukten. Vogel Business Media, Würzburg, 2018. ISBN 978-3-8343-3395-7
2. Kumke, Martin: Methodisches Konstruieren von additiv gefertigten Bauteilen. Springer, Wiesbaden, 2018. ISBN 978-3-658-22208-6
3. Heufler, Gerhard; Lanz, Michael; Prettenthaler, Martin: Design Basics : von der Idee zum Produkt. Niggli Verlag, Salenstein, 2019. ISBN 978-3-7212-0989-1

# ADDITIVE FERTIGUNG UND ICH...

Eine kleine Umfrage.

➔ [www.menti.com](http://www.menti.com)

➔ Code 4954 2702

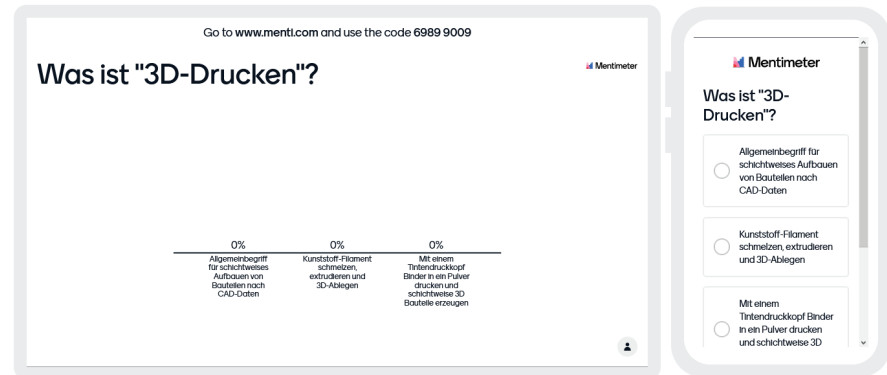


# WAS IST 3D-DRUCKEN?

Eine kleine Umfrage.

➔ [www.menti.com](http://www.menti.com)

➔ Code 7097 4518

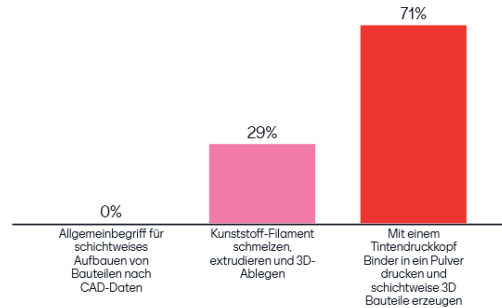


# WAS IST 3D-DRUCKEN?

Ergebnis der Teilnehmer-Umfrage:

## Was ist "3D-Drucken"?

Mentimeter



# EXKURS: „3D DRUCK“ ≠ 3D DRUCK

Stereolithographie

Laser-Strahlschmelzen

Elektronen-Strahlschmelzen

Multi-Jet Modeling

Poly-Jet Modeling

Wire Arc Additive Manufacturing

Digital Light Processing

Laser Pulver Auftragschweißen

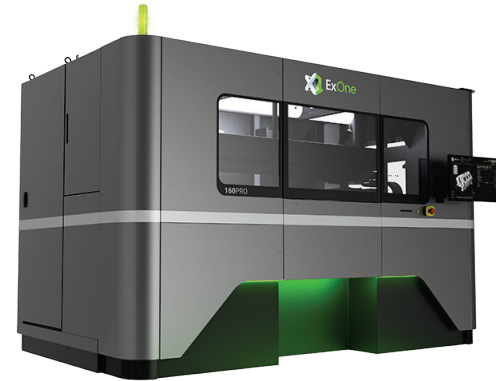
Laser-Sintern

### Fused Filament Fabrication



[Ultimaker]

### 3D-Drucken = Binder Jetting



[ExOne]



Design für die Additive Fertigung

## GLIEDERUNG

### 1. Motivation (I): Einführung in das Thema Fertigung und Fertigungsplanung

## AUFBAU DER VORLESUNG: EINFÜHRUNG

1	Einordnung: Fertigung
2	Hierarchie und Definitionen von Fertigungsprozessen
3	Fertigungsplanung
4	AM als Randbedingung für DfAM

# BEGRIFF: FERTIGUNG

- Duden:
- industrieller oder handwerklicher Produktionsprozess; Herstellung
  - Art, Weise, wie etwas gefertigt ist
  - Abteilung in einem Betrieb, in der der Produktionsprozess abläuft

IDEE



Konstruktions-  
unterlagen



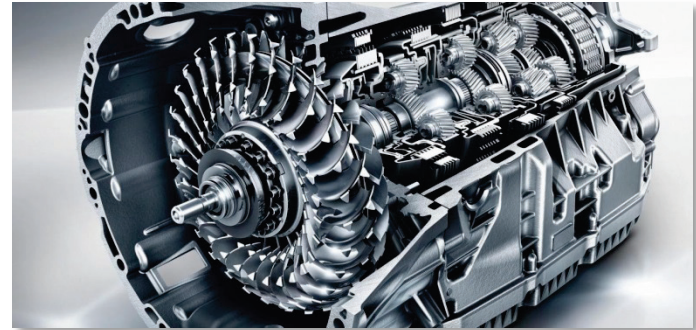
PRODUKT



# WARUM FERTIGUNGSTECHNIK?

## BEISPIEL: GETRIEBE / ZAHNRAD

- Um Produkte und Bauteile herzustellen, benötigt man Fertigungsverfahren
- I.d.R. werden mehrere Verfahren eingesetzt, um ein Bauteil zu fertigen
- Die Auswahl der Verfahren richtet sich u.a. nach **Material** und dessen Eigenschaften und Ausgangsform, zu erzeugender **Form**, Anforderung an **Oberflächen**, **Stückzahl**, **Kosten**
- Die Einteilung und Beschreibung der Verfahren erfolgt in einer Norm (z.B. DIN 8580)



## HAUPTZIELSETZUNG IM UNTERNEHMEN

Unternehmen folgen langfristig dem Unternehmensziel, **Gewinne zu erwirtschaften**. Das Streben nach **Wertschöpfung** ist dabei eine Interpretation dieses langfristigen Unternehmensziels. Wertschöpfung kann jedoch nur erreicht werden, wenn die **Zielgrößen** bezüglich der **Zeit**, **Kosten** und **Qualität** erfüllt werden.

Die Vielzahl von Einzelschritten in der **Produktion** benötigen jeweils eine bestimmte Zeit zu ihrer Ausführung. Je schneller diese zeitliche Wegstrecke überwunden wird, desto mehr Wertschöpfung kann mit den **verfügbaren Produktionsressourcen** erzielt werden. Die allgemeine Forderung nach einer Minimierung der Produktionskosten lässt sich durch eine alternative Formulierung des Wirtschaftlichkeitsprinzips erfassen:

***Mit dem gegebenen Wert der in das Produktionssystem eingehenden Güter ist ein maximales wertmäßiges Produktionsergebnis zu erzielen.***

Die **Produktqualität** und die daraus resultierende Kundenzufriedenheit sind entscheidende Wettbewerbsfaktoren. Die Produktionsqualität äußert sich in geringen Ausschussraten und vor allem in Funktionalität, Zuverlässigkeit und Langlebigkeit der erzeugten Produkte.

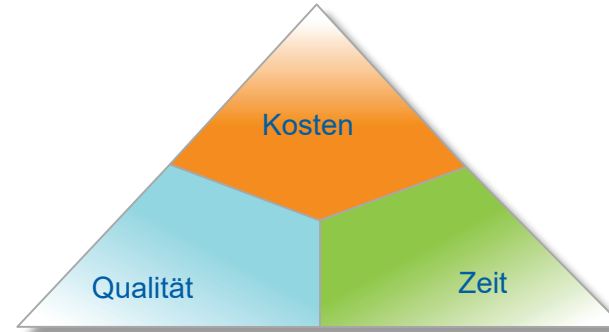
# HAUPTZIELSETZUNG IM UNTERNEHMEN II

Unternehmen:

- niedrige Kosten
- kostenoptimale Auslastung

Kunde:

- niedrige Preise



Unternehmen:

- Zuverlässige Fertigungsprozesse
- QS (ISO9000)

Kunde:

- hoher Qualitätsstandard
- Null-Fehler-Anlieferung

Unternehmen:

- Kurze Entwicklungszeiten
- Kurze Fertigungs- und Auftragsdurchlaufzeiten

Kunde:

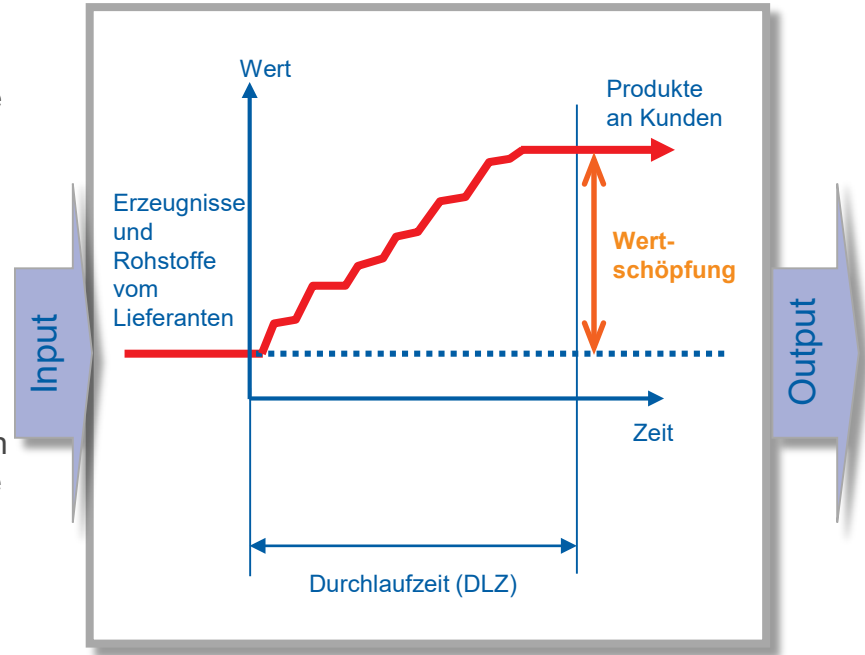
- Kurze Lieferzeiten
- Termintreue

# PRODUKTION ALS WERTSCHÖPFUNGSPROZESS

Wertschöpfung entsteht an jedem einzelnen Produktionssystem, wenn aus einfachen oder komplexen Teilen wertgesteigerte Teile erzeugt werden.

An der Wertschöpfungskette sind verschiedene Betriebe, Abteilungen und Personen beteiligt. Lieferanten stellen die für die Produktion benötigten Rohstoffe und Güter bereit, in den darauf folgenden Wertschöpfungsstufen entstehen nach und nach fertige Produkte.

Nicht alle Teilprozesse der Wertschöpfung werden an demselben Ort ausgeführt. In vielen industriellen Bereichen ist vielmehr eine internationale Arbeitsteilung zu beobachten, bei der einzelne Glieder der Wertschöpfungskette auf verschiedene Länder und Industriebetriebe verteilt sind.



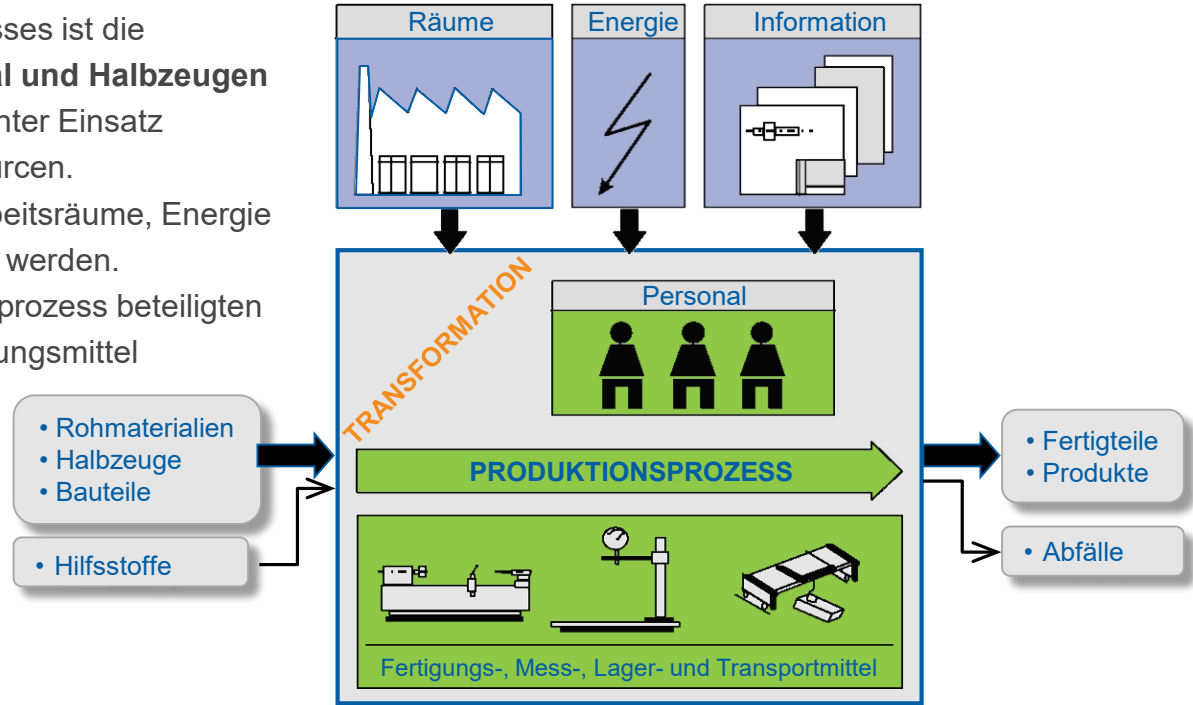
Quelle: Universität Duisburg/Essen; Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt, 2017

# ELEMENTE EINES PRODUKTIONSSYSTEMS

Aufgabe des Produktionsprozesses ist die **Umwandlung von Rohmaterial und Halbzeugen in Fertigteile oder Produkte** unter Einsatz vorhandener Produktionsressourcen.

Für diesen Prozess müssen Arbeitsräume, Energie und Informationen bereitgestellt werden.

Die unmittelbar am Produktionsprozess beteiligten Produktionsfaktoren sind Fertigungsmittel sowie Mess-, Lager- und Transporteinrichtungen. Zu ihrer Nutzung wird das entsprechende Personal eingesetzt.



Quelle: Universität Duisburg/Essen; Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt; 2017

# AUFBAU DER VORLESUNG

1	Einordnung: Fertigung
2	Definitionen und Hierarchie von Fertigungsprozessen
3	Fertigungsplanung
4	AM als Randbedingung für DfAM

## DEFINITION: FERTIGUNGSPLANUNG

Die **Fertigungsplanung** bezieht sich auf die zukünftige Gestaltung der Fertigung. Als Bindeglied zwischen der Konstruktion und der eigentlichen Fertigung und Montage **umfasst** sie alle Ingenieur Tätigkeit zum **Entwurf** und **Gestaltung von Fertigungsprozessen** mit den zugeordneten Fertigungsverfahren, sowie Maßnahmen zur **Sicherstellung der wirtschaftlichen Fertigung**.

Der **Prozessentwurf** bestimmt die erforderlichen Fertigungsverfahren einschließlich ihrer inhaltlichen Strukturen. Die Prozessgestaltung **liefert** die Auslegung der entworfenen Prozessstruktur, d.h. die Bestimmung der Fertigungsmittel im Fertigungssystem, Mess- und Prüfmittel und der technologischen Arbeitsgrößen sowie Fertigungszeiten. Beim Entwerfen und Gestalten von Fertigungsprozessen entstehen **oft mehrdeutige Fertigungslösungen**.

## BEGRIFFE FÜR DIE FERTIGUNGSPLANUNG

**Fertigen** ist das Schaffen und schrittweise Verändern der Form und/oder der Stoffeigenschaften eines geometrisch bestimmten festen Körpers, so dass dieser von einem Rohzustand in einen Fertigzustand überführt wird. Die einzelnen Schritte zum Fertigzustand werden als Arbeitsgang bezeichnet. Fertigen beinhaltet Teilefertigung und Montage.

**Fertigungsverfahren:** technische Umsetzung naturwissenschaftlicher Wirkprinzipie zur Fertigung geometrisch bestimmter fester Körper.

**Fertigungsprozess:** Folge aller zur Fertigung eines Werkstückes und Erzeugnisses erforderlichen technologischen Operationen, die sich als Arbeitsgänge mit Arbeitsstufen darstellen.

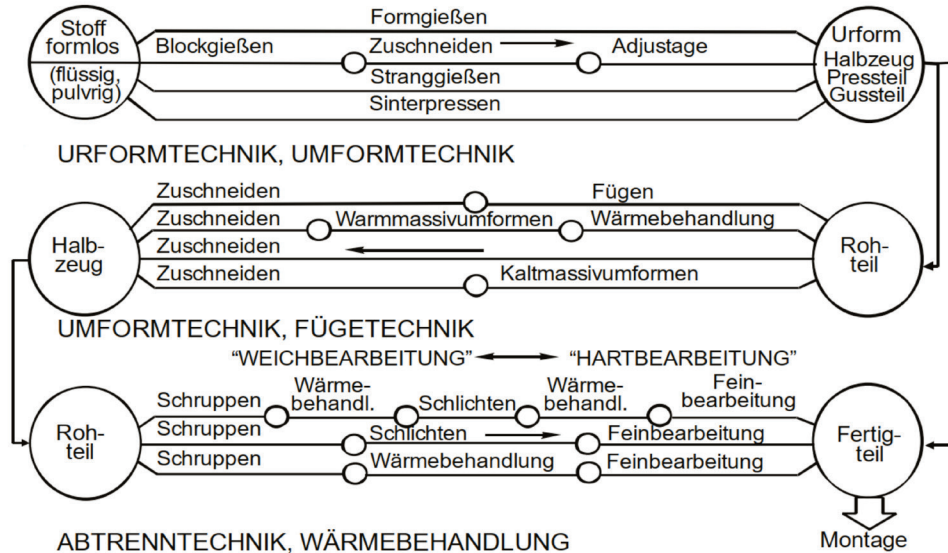
**Fertigungsaufgabe:** Gesamtheit der Merkmale und Bedingungen für die Fertigung von Werkstücken (Teilen).

**Fertigungsplanung,** (Teil der) **Arbeitsplanung** (Arbeitsplanung beinhaltet i.d.R. auch langfristige Überlegungen)

**Fertigungsvorbereitung** beinhaltet **Planung** und **Steuerung**.

# HORIZONTALE GLIEDERUNG VON FERTIGUNGSPROZESSEN

Horizontale Gliederung des gesamten Fertigungsprozesses erfolgt nach Funktionsbestimmungen der Teilprozesse. Grundsätzlich gilt die Reihenfolge: **Rohteilfertigung** → **Teilefertigung** → **Montage**.

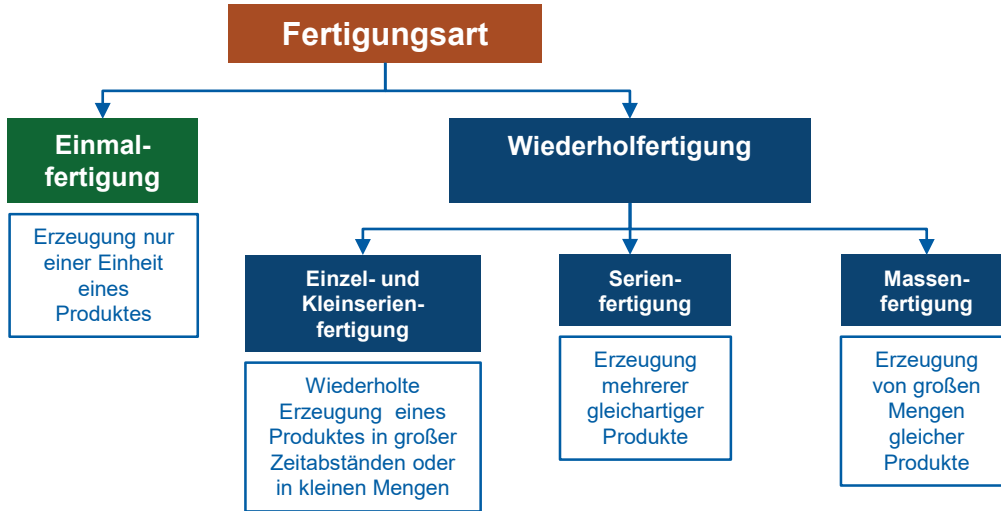


Quelle: Jacobs

# VERTIKALE GLIEDERUNG VON FERTIGUNGSPROZESSEN

Gliederungsstufe	Bezug	Beispiel
Fertigungsprozess	Erzeugnisherstellung	Teilefertigung und Montage
Fertigungsteilprozess	Einzelteilherstellung	Teilefertigung oder Montage
Fertigungsprozessesstufe	Technologisch bedingte Zwangsfolge	Drehen – Fräsen - Härten - Schleifen
Arbeitsgang	Technologische Operation auf einem Arbeitsplatz	Drehen
Spannstufe	Technologische Operation in <u>einer</u> Aufspannung	Drehen einer Seite einer Welle
Arbeitsstufe	Technologische Operation mit <u>einem</u> Werkzeug	Schruppdrehen einer Seite einer Welle
Operation	Arbeitsstufenteil mit konstan- ten technologischen Werten	Schruppschnitt beim Drehen einer Welle

# FERTIGUNGSART



**Fertigungsart** ist die Kennzeichnung für die Eimalfertigung oder Wiederhol-fertigung. Sie kennzeichnet neben der Auflagenhöhe (Stückzahl), die Wiederhol-fähigkeit identischer oder gleicher Fertigungsvorgänge in der Produktion. Fertigungsart eines Unternehmens steht im engen Zusammenhang mit der Fertigungsorganisation.

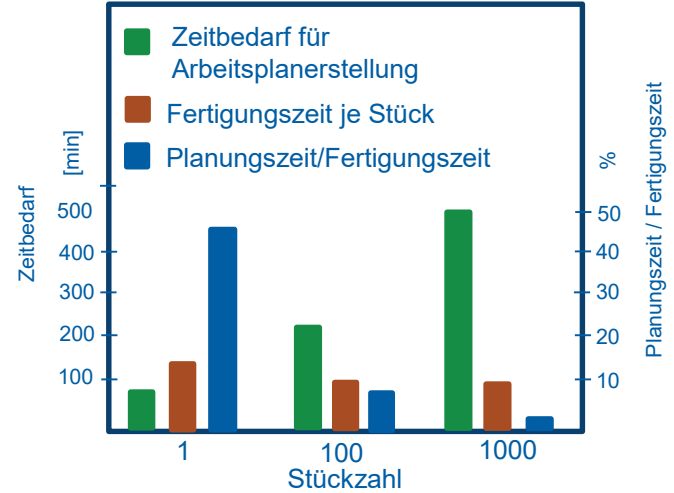
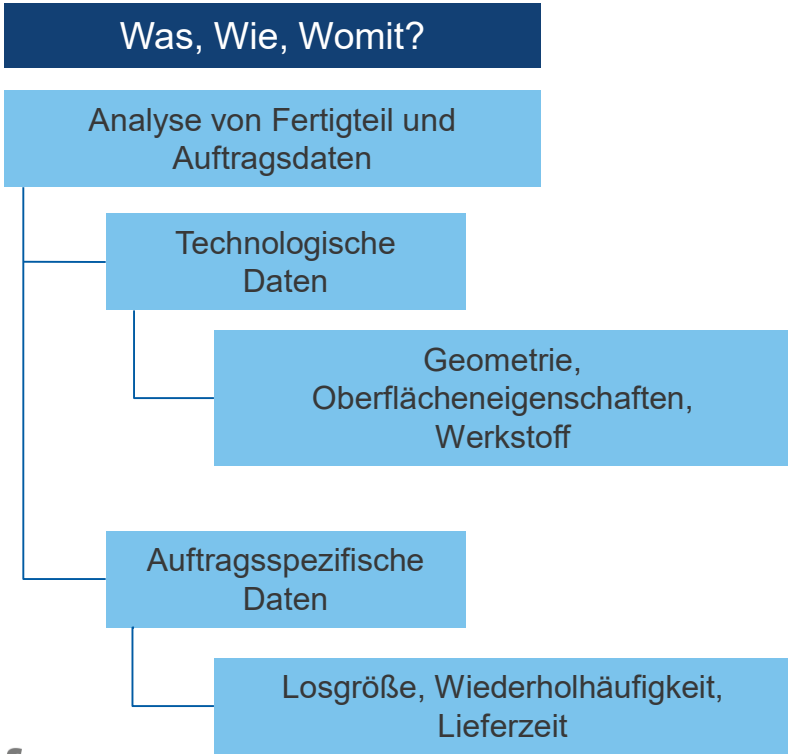
**Beispiele für die Serienfertigung:**

- Einzel- und Kleinserienfertigung = unter 20 Stück pro Monat. (Bei 5-Tage-Woche = max. 1 Stk/Tag)
- Mittelserienfertigung = 20–1000 Stück pro Monat.
- Großserienfertigung = über 1000 Stück pro Monat

## AUFBAU DER VORLESUNG

1	Einordnung: Fertigung
2	Hierarchie und Definitionen von Fertigungsprozessen
3	Fertigungsplanung
4	AM als Randbedingung für DfAM

# ANALYSE DER FERTIGUNGSAUFGABE



**Planungsaufwand pro Stück ist umso höher je geringer die Stückzahl!**

Quelle: nach Wiendahl

Design für die Additive Fertigung

## WESENTLICHE SCHRITTE DER PLANUNG VON NEUEN PROZESSFOLGEN

Analyse der Fertigungsaufgabe



Auswahl technologisch möglicher  
Verfahrensalternativen



Aufstellung alternativer  
Prozessketten

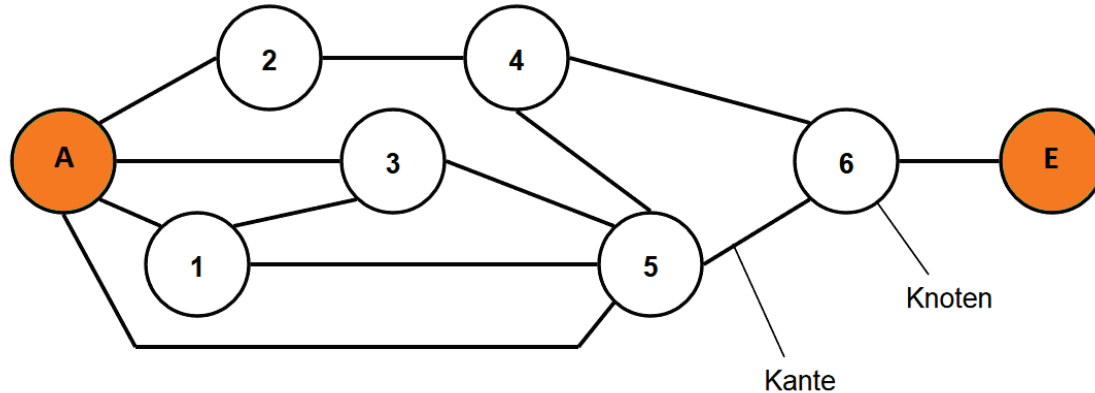


Wirtschaftliche Bewertung der  
Prozessketten



Optimierung der gewählten Prozessfolge  
hinsichtlich der vorgegebenen Zielfunktion

# GRAPHISCHE DARSTELLUNG VON FERTIGUNGSPROZESSEN

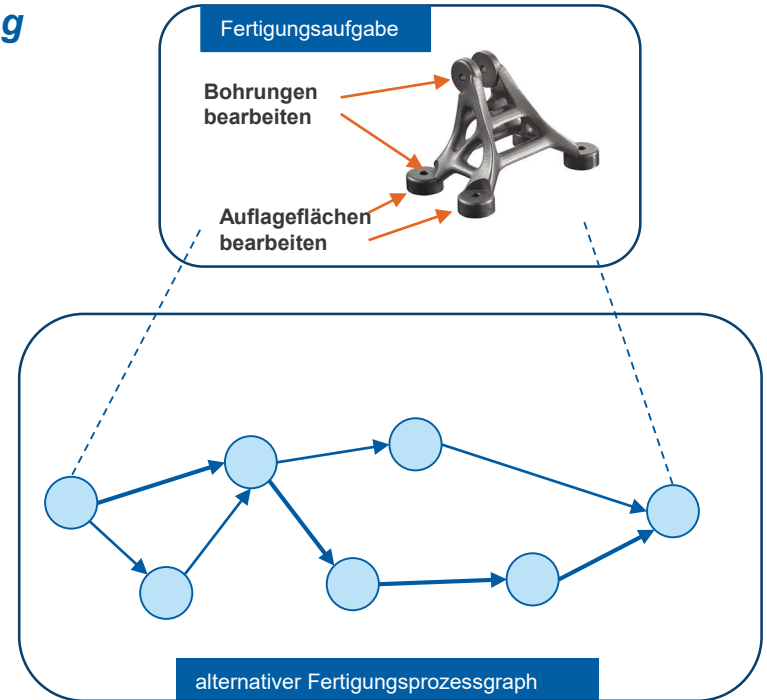


A, E	Ausgangszustand, Endzustand
Knoten (1, 2, 3, 4, 5, 6)	Zwischenzustände
Kanten	Bearbeitungsschritte

# FERTIGUNGSPLANERSTELLUNG NACH GENERIERUNGSPRINZIP

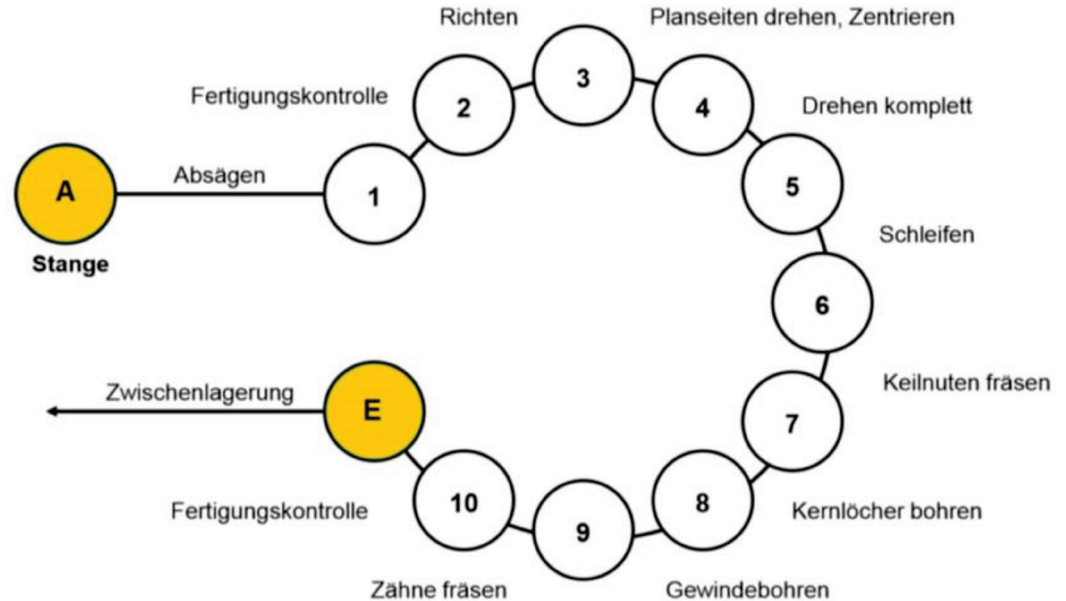
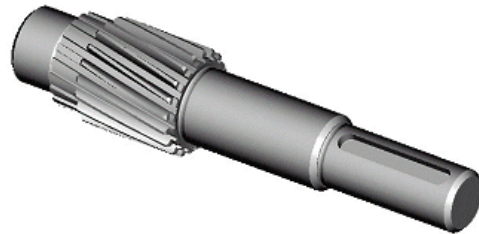
## Fertigungsprozessausarbeitung: Grobplanung

- Anhand der **Zuordnung** der Werkstückoberflächen zu den technisch möglichen Fertigungsverfahren und durch eine **Synthese** werden die technisch zweckmäßigen möglichen Bearbeitungsfolgen ermittelt
- Dabei können mehrere alternative, fertigungstechnisch definierte **Prozessvarianten** entstehen.



# EINDEUTIGER PROZESSGRAPH FÜR DIE FERTIGUNG EINER WELLE

Eindeutige Lösung ist dann gegeben, wenn der Fertigungsaufgabe nur eine technologische Lösung zuzuordnen ist.



# MEHRDEUTIGKEIT

Eine mehrdeutige Lösung ist gegeben, wenn den Parametern der Fertigungsaufgabe, wie

- Werkstückgeometrie und -qualität,
- Auftragsstückzahl,
- personelle, zeitliche und materielle Kapazitäten u.a.

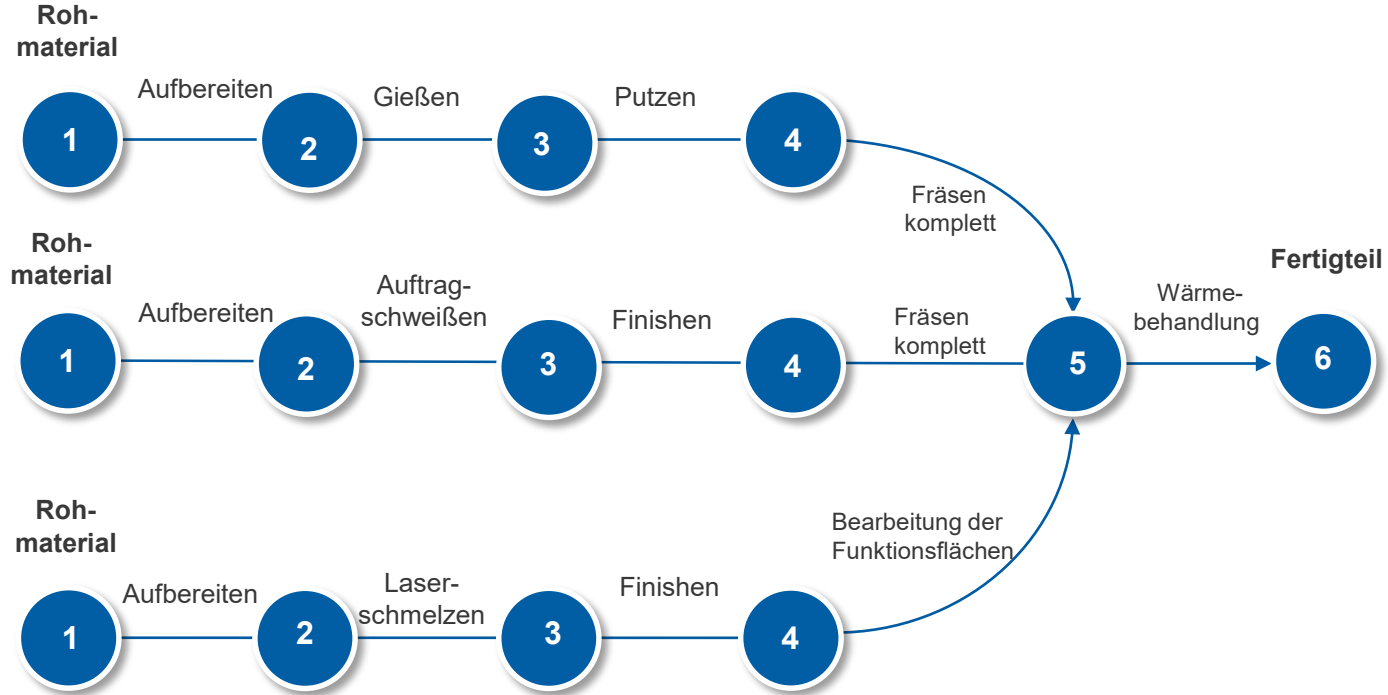
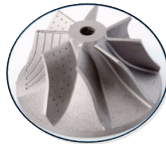
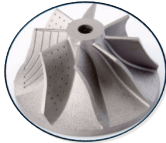
mehrere Lösungen für Parameter des Fertigungsprozesses, wie

- Rohteil,
- Fertigungsverfahren und deren Folge,
- Maschinen,
- Werkzeuge, Schneidstoffe,
- technologische Arbeitswerte usw.

zuzuordnen sind.

# Design für die Additive Fertigung

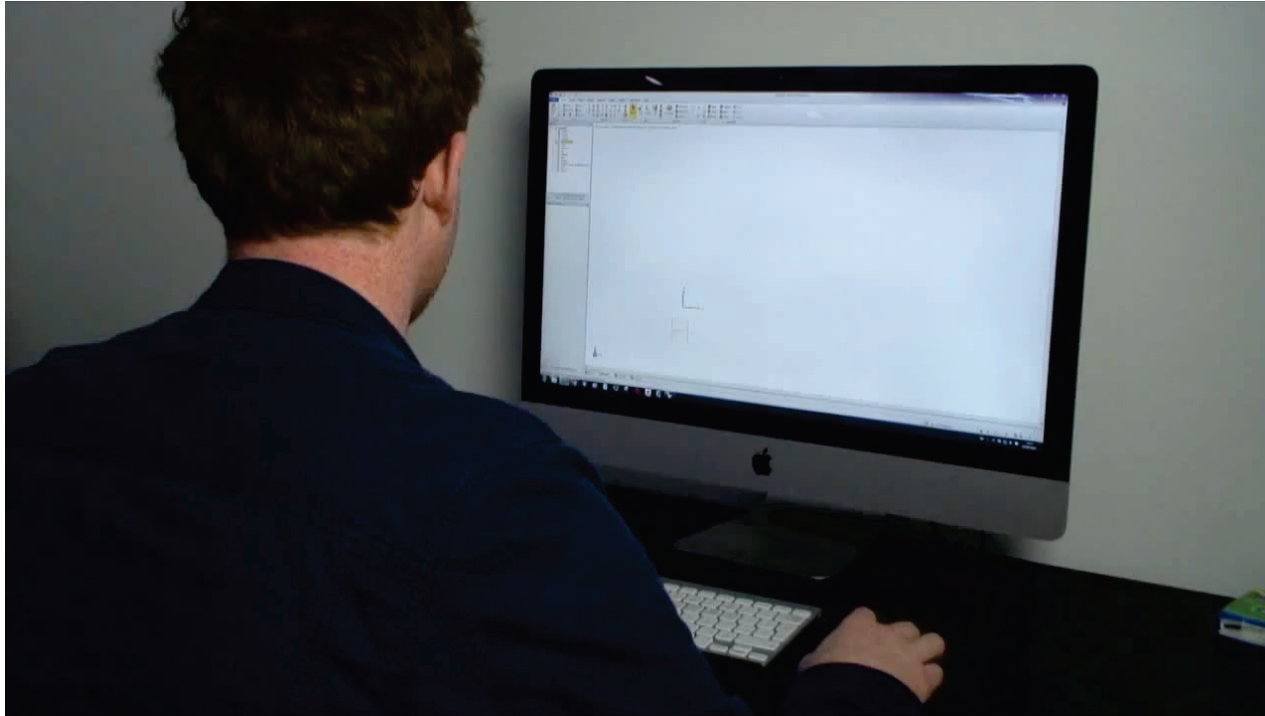
## BEISPIELHAFTER ALTERNATIVER (MEHRDEUTIGER) FERTIGUNGSPROZESSGRAPH



# AUFBAU DER VORLESUNG

1	Einordnung: Fertigung
2	Hierarchie und Definitionen von Fertigungsprozessen
3	Fertigungsplanung
4	AM als Randbedingung für DfAM

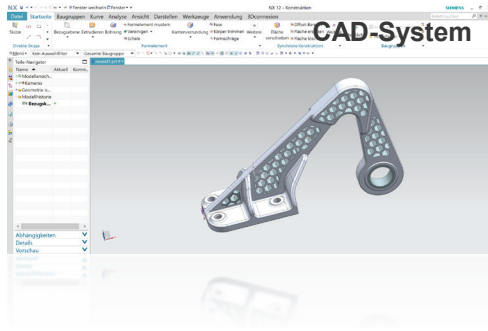
# SELEKTIVES LASER SINTERN (SLS)



# VERFAHRENSABLAUF

## 1. 3D-CAD-Modell

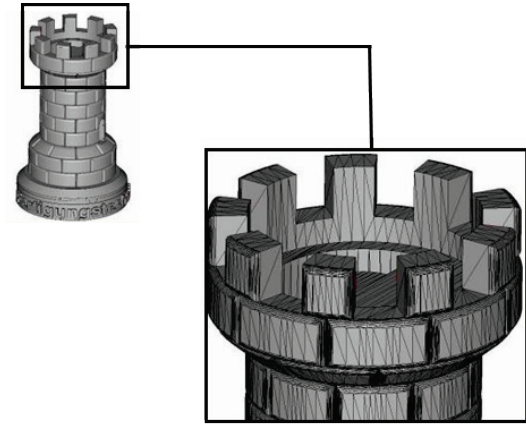
- Ausgangspunkt des Fertigungsprozesses
- Die 3D-CAD-Daten stammen aus der Konstruktion, dem Reverse Engineering oder aus der Medizin (Computertomographie)
- Formate z. B.: STL, IGES, STEP



# VERFAHRENSABLAUF

## 2. Triangulation

- Möglichst genaue Annäherung der Geometrieoberfläche durch Dreiecke
  - Triangulationsfehler treten verstärkt an stark gekrümmten Freiformflächen auf
- Anzahl der Dreiecke so **genau wie nötig**, aber nicht so genau wie möglich gestalten.
- Die Überprüfung der Geometrie des Bauteils ist nach der Triangulation unabdingbar



STL-Modell mit triangulierter Oberfläche

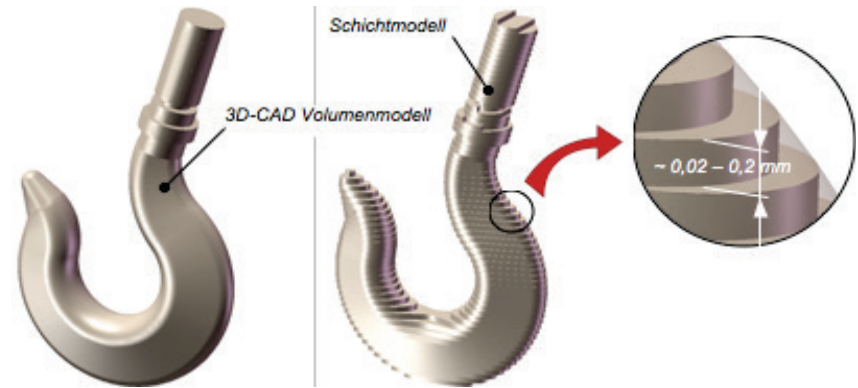
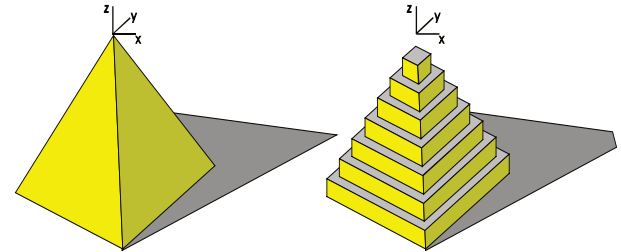


Gefertigtes Bauteil

# VERFAHRENSABLAUF

## 3. Modellaufbereitung

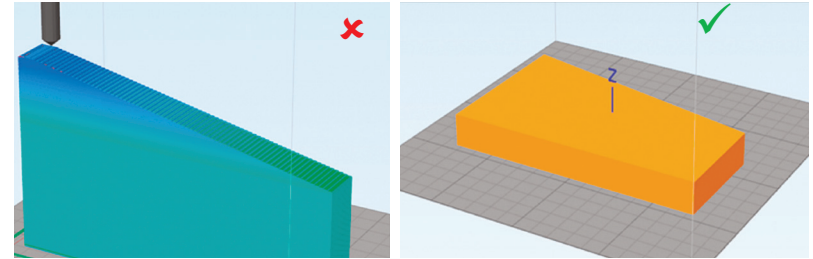
- Bauteil (STL-Modell) in Schichten „zerlegen“
- Für jede Schicht werden Geometrieinformationen für den Bauvorgang erzeugt
- „Stufeneffekt“ an Rundungen, Freiformflächen und stumpfen Winkeln  
→ geringe Oberflächenqualität



# VERFAHRENSABLAUF

## 3. Modellaufbereitung

- Für gute Oberflächenqualität und -genauigkeit sollten gerade Bauteilflächen *möglichst vertikal oder horizontal* im Bauraum angeordnet sein  
 → Stufeneffekte werden minimiert
- Je größer die Schichtdicke ist, desto kürzer die ist Bauzeit aber der Stufeneffekt wird größer.  
 → abwägen von Qualität und Produktivität

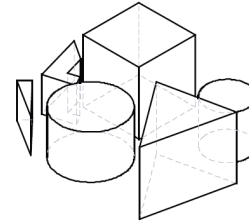


# VERFAHRENSABLAUF

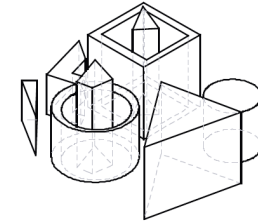
## 3. Modellaufbereitung

- Durch optimales *Verschachteln (nesting)* und *Packen (packing)* kann bei der Einhaltung der geforderten Qualität höhere Produktivität erzielt werden
- Die Verschachtelung bzw. das Packen haben verfahrensabhängig unterschiedliche Optionen

### *Verschachteln (nesting)*

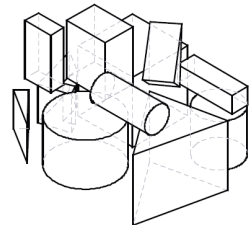


a) *nebeneinander*

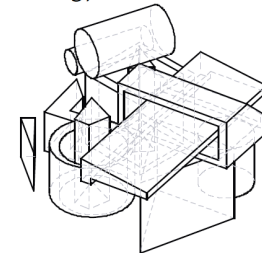


b) *nebeneinander, ineinander*

### *Packen (packing)*



c) *nebeneinander, übereinander*

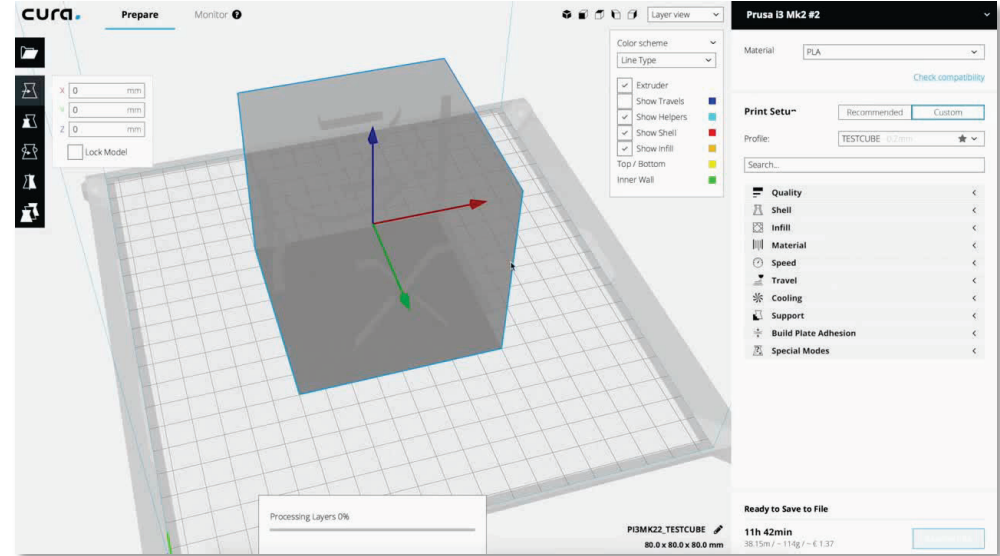


d) *nebeneinander, übereinander, ineinander*

# VERFAHRENSABLAUF

## 4. Prozessvorbereitung

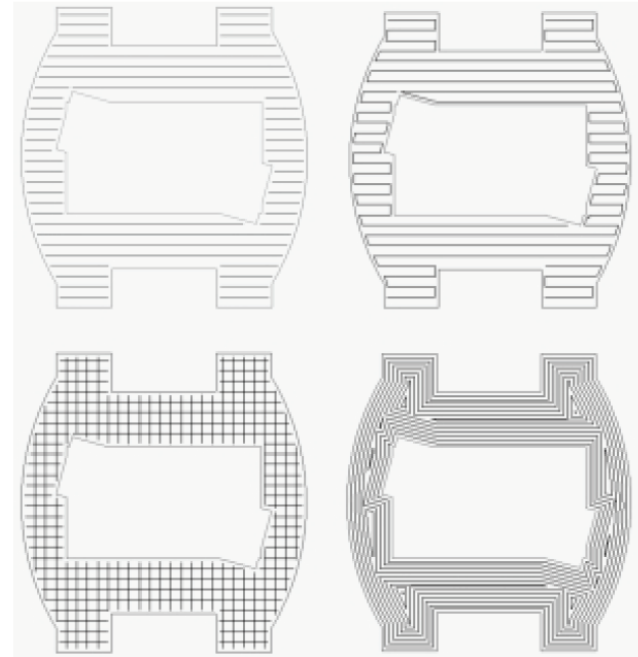
- Verfahrensabhängig sind Informationen über die „Füllung“ (*infill*) des Bauteils anzugeben (im STL-Datensatz sind nur Informationen zur Oberfläche hinterlegt)
- Wirkt sich u.a. auf Materialbedarf, Bauteilgewicht, Bauzeit, Stabilität des Bauteils aus



# VERFAHRENSABLAUF

## 4. Prozessvorbereitung:

- Schichtinformationen werden in die Steuerinformationen der Anlage umgewandelt
- Materialspezifische Verarbeitungseigenschaften sind zu beachten
- Scannen: Pfade berechnen, die während des Bauprozesses abgefahren werden
  - Einfluss u.a. auf Bauzeit, Energie- und Temperaturverteilung auf der Bauplattform

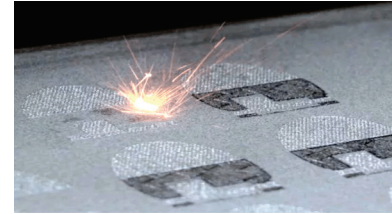


Unterschiedliche Scan-Strategien beim SLS

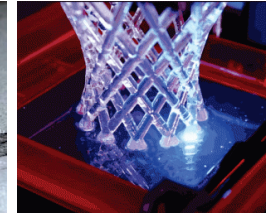
# VERFAHRENSABLAUF

## 5. Bauprozess:

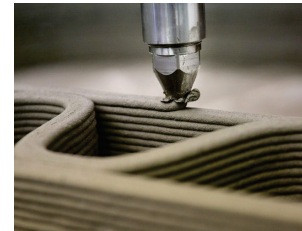
- Ausgangsmaterialschicht wird auf die Bauplattform aufgebracht (Pulver- und Flüssigbettprozesse)
- Ausgangsmaterial wird selektiv durch eine Energiequelle kurzzeitig geschmolzen oder einen chemischen Aktivator verfestigt
- Absenken der Plattform um eine Schichtdicke und Aufbringen einer neuen Materialschicht



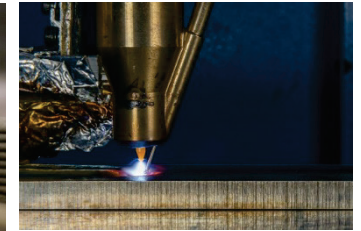
SLM-Prozess



DLP-Prozess



Material extrudieren



WAAM-Prozess

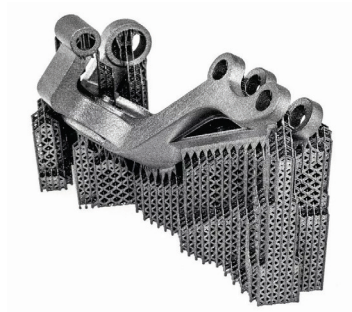
# VERFAHRENSABLAUF

## 6. Nachbearbeitung:

- Nicht verwendetes Material entfernen
- Stützkonstruktionen entfernen (verfahrensabhängig)
- Material aushärten (verfahrensabhängig)



Pulverentfernung



Metallbauteil mit Stützstruktur

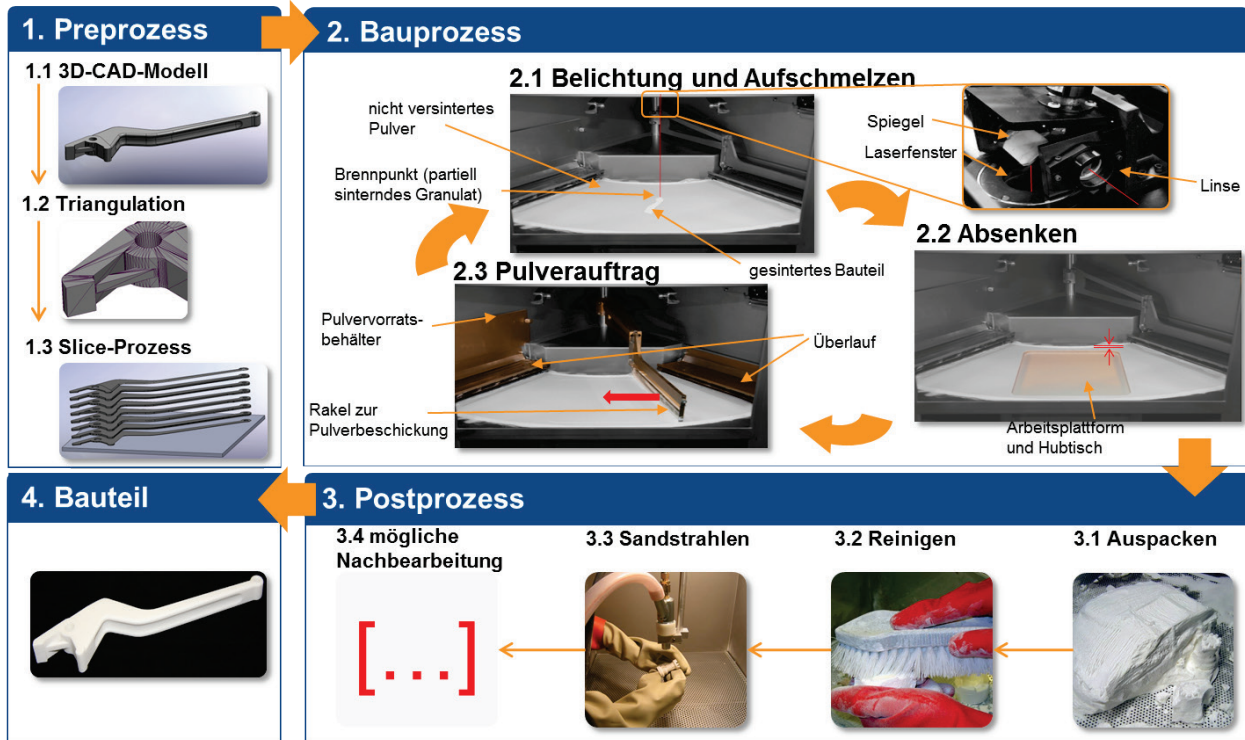


SLA-Bauteil

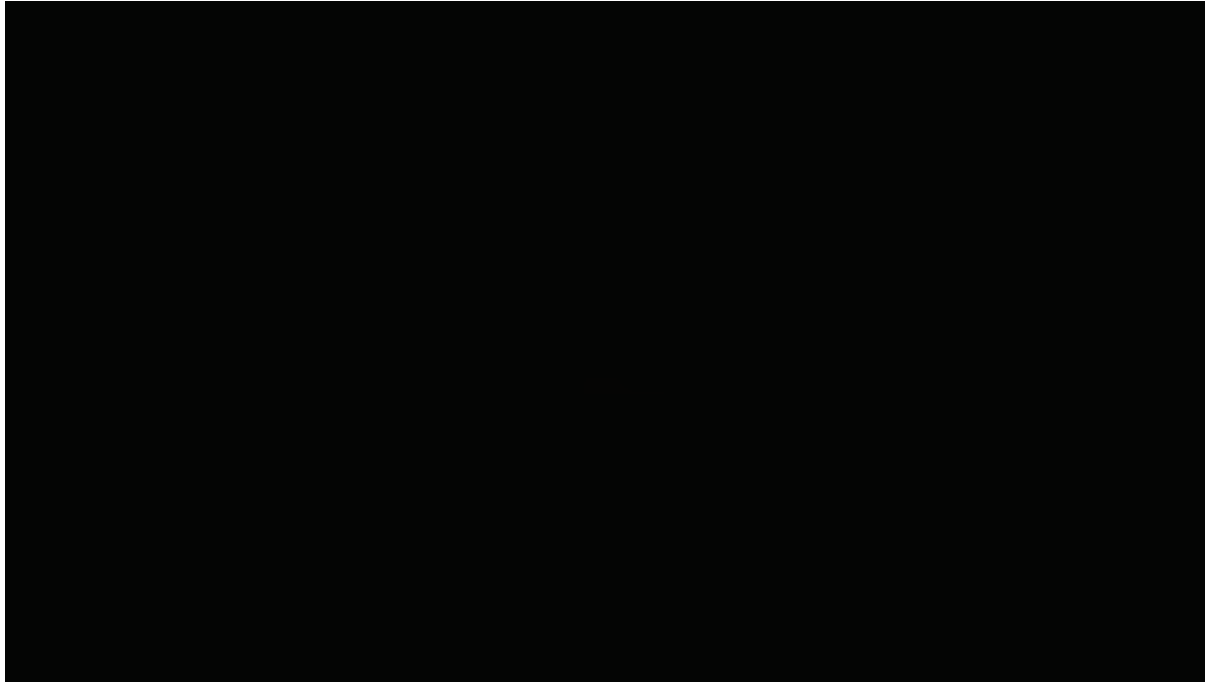


UV-Aushärtekammer

# PROZESSABLAUF AM BEISPIEL SLS



# LASERSTRAHLSCHMELZEN (LBM)





Design für die Additive Fertigung

# Design für die Additive Fertigung 2021 - 01

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

