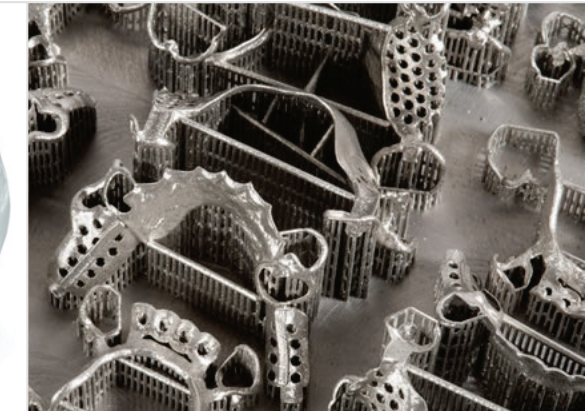
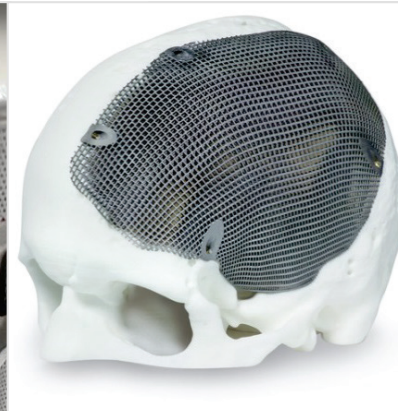


FERTIGUNGSPLANUNG IN DER ADDITIVEN FERTIGUNG



Wintersemester 2021/22

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

7.2.2	Planung von In-Processing in der Additiven Fertigung	
	Materialaufbereitung	
	7.2.2.1	Materialbereitstellen
	7.2.2.2	Materialrückführung
7.2.3	Post-Processing	
	7.2.3.1	Notwendigkeit der Folgeprozesse
	7.2.3.2	Post-Processing bei verschiedenen Werkstoffen

IN-PROZESS

- Auswahl geeigneter AM-Verfahren
- Planen der Maschinenbelegung
- Organisation Materialmanagement
- Planen von Hilfsstoffen

AUSWAHL GEEIGNETER ADDITIVER FERTIGUNGSVERFAHREN

Randbedingungen:

- Werkstückabmessungen;
- Struktur;
- Oberfläche;
- Werkstoff;
- Mechanische Eigenschaften;
- Einsatzzweck: Funktional oder optisch
- Stückzahl



→ **bestimmen die Machbarkeit**

→ **bestimmt den Kostenaspekt**

Kriterien:

- kurze Durchlaufzeiten;
- niedrige Kosten;
- höhere Prozesssicherheit
- höherer Automatisierungsgrad
- höherer Innovationssprung

ÜBERSICHT ÜBER DIE ADDITIVEN FERTIGUNGSVERFAHREN VDI 3405

Verfahren	Werkstoff				
	Papier	Kunststoff	Formsand	Metall	Keramik
Stereolithografie (SL)					
Laser Sintern (LS)					
Laser-Strahlschmelzen					
Elektronen-Strahlschmelzen					
Fused Layer Modeling / Manufacturing (FLM)					
Multi-Jet Modeling (MJM)					
Poly-Jet Modeling (PJM)					
3-D Drucken					
Layer Laminated Manufacturing (LLM)					
Digital Light Processing (DLP)					
Thermotransfer-Sintern					

EIGNUNG ADDITIVER FERTIGUNGSVERFAHREN IN ABHÄNGIGKEIT VON DEN PRODUKTANFORDERUNGEN

Additives Fertigungsverfahren	Anforderungskriterien						
	Gestalterisch	Geometrisch	Verarbeitungstechnisch	Mechanisch	Thermisch	Elektrisch	Chemisch
Stereolithografie	+	+	o	o	o	o	o
Laser Sintern	o	+	+	+	+	+	+
Laser-Strahlschmelzen	o	+	+	+	+	+	+
Elektronen-Strahlschmelzen	o	+	+	+	+	+	+
Fused Layer Modeling / Manufacturing	o	o	+	+	+	+	+
Multi-Jet Modeling	+	+	+	o	o	-	-
Poly-Jet Modeling	+	+	+	o	o	-	-
3-D Drucken	+	o	o	-	-	-	-
Layer Laminated Manufacturing	o	+	o	o	o	-	-
Digital Light Processing	+	+	o	o	o	-	-

+ empfehlenswert o teilweise empfehlenswert - nicht empfehlenswert

Fertigungsplanung in der Additiven Fertigung

AUSWAHL EINES AM-VERFAHRENS ZUR DIREKTEN HERSTELLUNG EINES BAUTEILES



Saugrohr

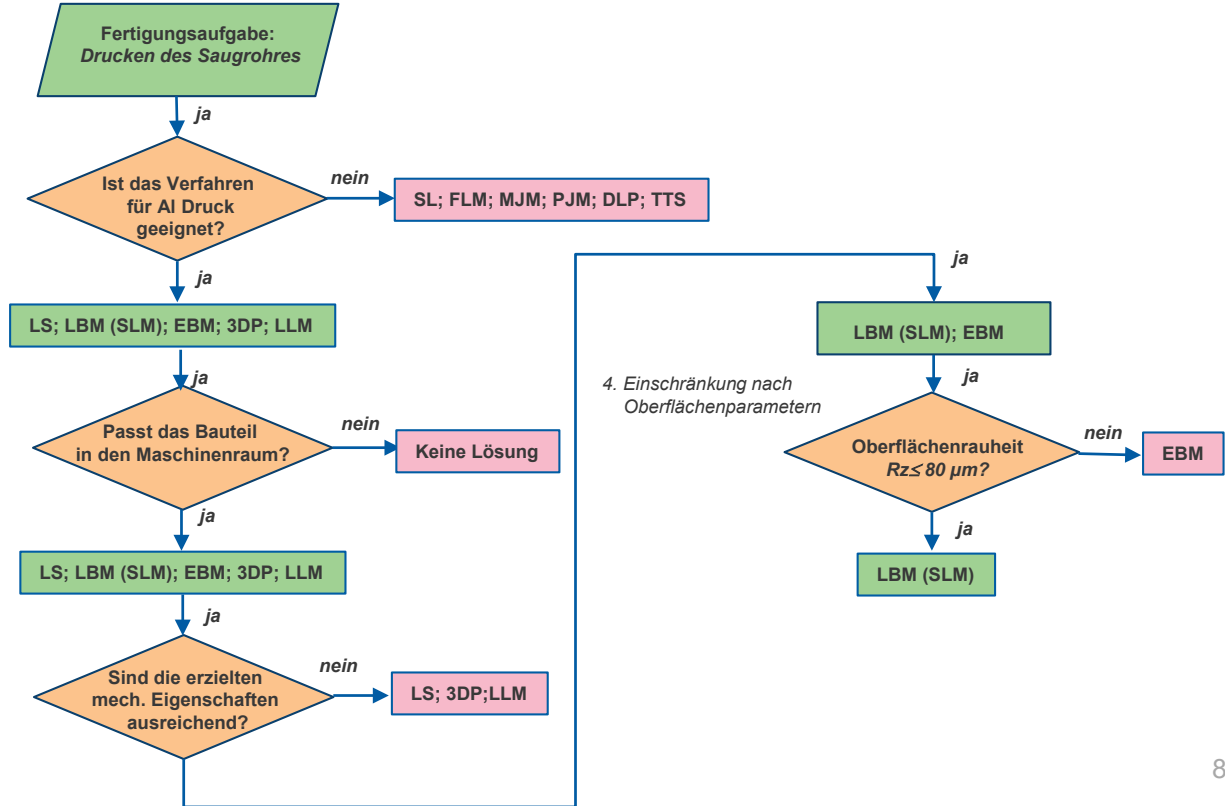
Material: AlSi10Mg
 Abmessungen:
 250x180x180 mm³
 Oberflächen-
 Rauheit: Rz 80µm



1. Einschränkung nach Werkstoffart

2. Einschränkung nach Bauraum der Maschine

3. Einschränkung nach Werkstoffeigenschaften



PLANUNG DER SIMULTANEN FERTIGUNG

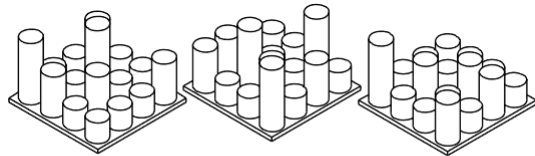
Vorteile

- Es ist möglich, die Bauteile neben- und ineinander zu verschachteln (engl. **nesting**) oder zusätzlich auch übereinander zu packen (engl. **packing**).
- Durch die simultane Fertigung mehrerer Bauteile werden die Rüst- und Beschichtungszeiten pro Los minimiert. Damit kann die Anlagennutzung erhöht und Kosten eingespart werden.

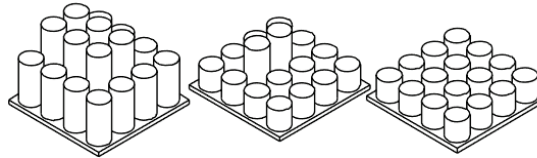
Anforderungen

- Die simultane Fertigung mehrerer Bauteile in einem Bauprozess verlangt optimale Bauteilanordnung.
- Bei der simultanen Fertigung sollen die gegenseitigen Wechselwirkungen zwischen den Bauteilen berücksichtigt werden. Insbesondere tritt dieser Effekt bei wärmelastigen Bauprozessen stark auf. Durch die gegenseitige Wärmeeinwirkungen kann eine signifikante Qualitätsbeeinträchtigung auftreten.
- Bei verschachtelter Bauteilanordnung soll die Entformbarkeit bzw. das Auspacken der Bauteile sichergestellt werden.
- Stützkonstruktionen zwischen zwei Bauteilen sind zu vermeiden.
- Zwischen den Bauteilen soll ein prozessabhängiger Mindestabstand vorgesehen werden.

WIRTSCHAFTLICHE BAUTEILREIHENFOLGE DURCH ZEITERSPARNIS



unwirtschaftliche Permutation:
Gesamtdauer: 122 h (100 %)

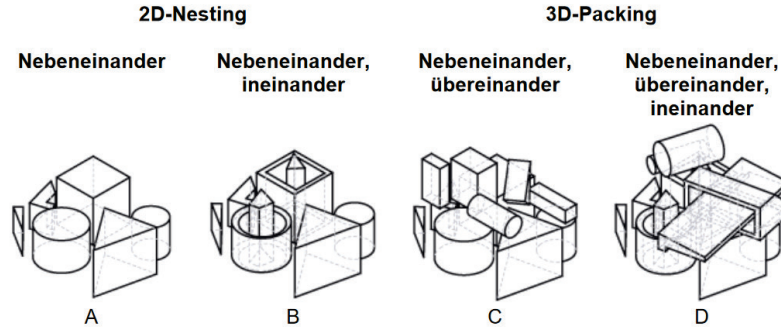


wirtschaftliche Permutation:
Gesamtdauer: 84 h (69 %)

Beispiel: alle Bauteile haben je 50mm Durchmesser sowie 6x150mm, 12x100mm und 30x50 mm Höhe. Schichtdicke 20 µm. Belichtungszeit je Schicht für eine Kontur und Fläche pro Bauteil: ca. 0,561 s. Auf Grund der Anzahl der Bauteile sind drei aufeinanderfolgende Bauprozesse erforderlich.

Quelle: Martha, M. Optimierung des Produktentwicklungsprozesses durch CAD-CAM-Integration im Kontext der additiven Fertigung, Diss., Uni Duisburg, -Essen 2015

KLASSIFIZIERUNG DER VERSCHACHELUNGS- UND PACKUNGSTYPEN



Exemplarische Verschachtelungsparameter für einige AM-Verfahren

Verfahren	Material	Verschachtelungstyp
Laser Sintern	Kunststoffpulver	D
Strahlschmelzen	Metallpulver	B
Fused Layer Modeling	Kunststoffdraht	A
Poly Jet Modeling	diverse	B
Multi Jet Modeling	Wachs	B
3D Druck	Diverse Pulver	D
Stereolithografie	Fotopolymere	B

AUFBAU DER VORLESUNG: PLANUNG DER PROZESSE

7.2.2	Planung von In-Processing in der Additiven Fertigung	
	Materialaufbereitung	
	7.2.2.1	Materialbereitstellen
	7.2.2.2	Materialrückführung
7.2.3	Post-Processing	
	5.2.3.1	Notwendigkeit der Folgeprozesse
	5.2.3.2	Post-Processing bei verschiedenen Werkstoffen

MATERIALAUFBEREITUNG

- Die Aufbereitung des Eingangsmaterials dient zur Sicherung von Materialeigenschaften, wie Reinheit, Rieselfähigkeit, Feuchtigkeitswerte usw., die eine Voraussetzung zur erfolgreichen Prozessrealisierung darstellen.
- Der Aufbereitungsprozess hängt vom AM-Prozess und dazu verwendeter Materialart ab.
- Feste Materialien, wie Filament, Papierrolle oder Metallplatten erfordern keine besondere Vorbehandlung. Sie können direkt in der Anlage eingesetzt werden. Die Pulvermaterialien werden dagegen durch Aufbereitungsprozesse in einsatzfähigen Zustand gebracht.

VERSORGUNG EINER SAND-DRUCK-ANLAGE MIT DEM PULVER

- 1 - Sand-Silo
- 2- Ansaugschläuche
(Frischsand und Recyclingsand)
- 3 - Ansaugbehälter



Fertigungsplanung in der Additiven Fertigung

PULVERKREISLAUF IM AM-PROZESS VON METALLBAUTEILEN (VIDEO)

TruPrint
Industrielles Teile- und Pulvermanagement



PULVERHANDLING

- Beim Sieben, Mixen oder der Pulverförderung, aber auch bei sehr niedriger Luftfeuchtigkeit tritt elektrostatische Aufladung des Pulvers auf. Sie führt zu Problemen:
 - Pulver ist klumpig (schneeflockenartig).
 - Kein Material im Beschichter.
 - Während des Siebens wird das meiste Pulver in den Abfallbehälter befördert.
 - Pulver lässt sich nicht homogen mischen.
- Beim Transport der Pulver in das Maschinensilo kann die elektrostatische Aufladung durch den Einsatz spezieller Rohrleitungen minimiert werden.
- Durch das Lagern des empfindlichen Pulvers nach dem Sieben und Mischen (mind. 24 Stunden) in einem Behälter kann elektrostatische Aufladung entladen werden.

BEREITSTELLUNG DER BINDEMITELE

- Bei den Binder Jetting Verfahren kommen Bindemittel zum Einsatz, um die Pulverpartikel und erzeugte Schichten im Prozess zusammenzukleben.
- Bindemittel sind in der Regel flüssige chemische Zusätze, die während des Prozesses nach der Aufbringung der Pulverschicht auf die Bauoberfläche durch gezielte Aktivierung (Drucken durch den Druckkopf und dadurch Verflüchtigen des Lösemittels) selektiv ausgehärtet werden.
- Bei festkörperartigen Bindemitteln (Pulver) wird dieses in der Aufbereitungsphase mit dem AM-Pulver vermischt und für den AM-Prozess bereitgestellt. Die selektive Aktivierung erfolgt dann durch den Druckprozess (zweite, flüssige Komponente wird durch den Druckkopf aufgebracht).



AUFBAU DER VORLESUNG: PLANUNG DER PROZESSE

7.2.2	Planung von In-Processing in der Additiven Fertigung	
	Materialaufbereitung	
	7.2.2.1	Materialbereitstellen
	7.2.2.2	Materialrückführung
7.2.3	Post-Processing	
	7.2.3.1	Notwendigkeit der Folgeprozesse
	7.2.3.2	Post-Processing bei verschiedenen Werkstoffen

TRENNEN UND SIEBEN VON PULVERN BEIM AUSPACKEN

- Beim Auspacken der Teile sollte verbackenes Pulver sofort aussortiert und entfernt werden (grobe Trennung).
- Nicht gebundenes Pulver wird aus der Jobbox manuell in einen Pulverabscheider ausgesaugt.
- Altpulver wird bei der Prozessführung nach vorgeschriebener Rezeptur mit Neupulver vermischt. Der Anteil des Altpulvers bei einer guten Aufbereitung kann bis auf 50% steigen.
- Wiederverwendung einiger Pulvermaterialien ist aufgrund von Alterungsprozessen nur begrenzt möglich (z.B. Polyamid Pulver PA12).



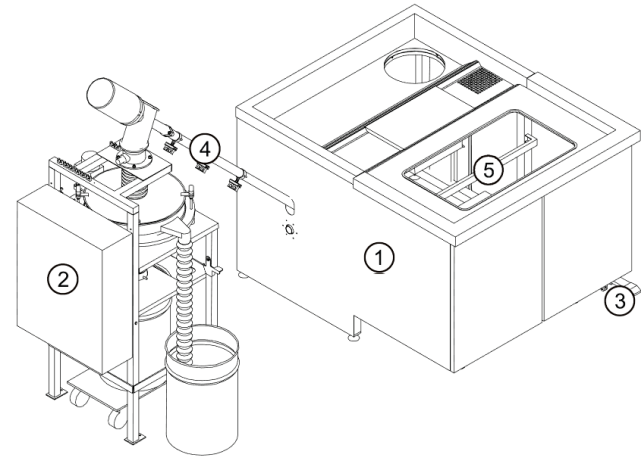
Quelle: TRUMPF

AUFBEREITUNG VON ALTPULVERN (SLS)

Ein Auspack- und Siebmodul der gesinterten Bauteile:

- Überschüssiges, wiederverwertbares Altpulver gelangt über den Altpulverbehälter in den Spiralförderer (4).
- Über den Spiralförderer (4) wird das Pulver zum Siebmodul (2) gefördert, wo es anschließend gesiebt wird.
- Das entstandene Recyclingpulver wird in die Pulverförderanlage gefüllt und somit wieder dem Bauprozess zugeführt.

Die Auspack- und Siebanlage EOSINT P 730



Auspackmodul (1) und Siebmodul (2)

SIEBEN VON ALTPULVERN (SLS)

Eine Siebeinrichtung für Kunststoffpulver

- Einrichtung ermöglicht, die Altpulver von SLS Prozessen zu recyceln.
- Durch Vibration in geschlossener Kammer werden grobkörnige Pulver aussortiert.
- Das Sieben findet in einer mit inerten Gasen befüllten Umwelt statt, um das Eindringen von Sauerstoff und Luftfeuchtigkeit zu verhindern.
- Zum Sieben des Pulvers wird üblicherweise ein Siebaufsatz verwendet, welcher durch kontinuierliche Vibration in Bewegung versetzt wird. Der Siebboden des Aufsatzes ist ein aus Quadratmaschen bestehendes Drahtgewebe mit Leinwandbindung



DOSIEREN UND MISCHEN DER PULVER

- Das Mischen von Alt- und Neupulver findet in einer Kammer statt, die entweder außerhalb der Maschine platziert oder in die Maschineneinheit integriert ist.
- Mischkammer besteht aus einem Behälter und einem Rührwerk.
- Pulversversorgung erfolgt durch zwei Rohrleitungen aus den Behälter mit Alt- und Neupulver.
- Das Verhältnis Alt/Neupulver wird entsprechend den Prozessanforderungen festgelegt.

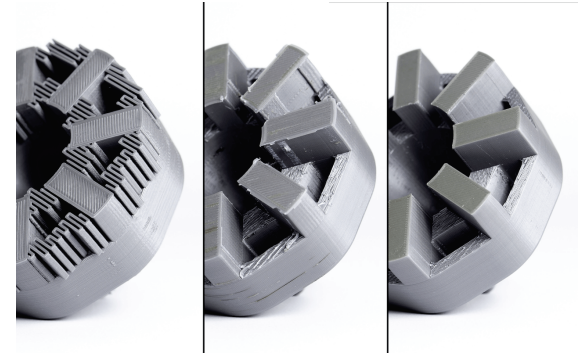


AUFBAU DER VORLESUNG: PLANUNG DER PROZESSE

7.2.2	Planung von In-Processing in der Additiven Fertigung	
	Materialaufbereitung	
	7.2.2.1	Materialbereitstellen
	7.2.2.2	Materialrückführung
7.2.3	Post-Processing	
	7.2.3.1	Notwendigkeit der Folgeprozesse
	7.2.3.2	Post-Processing bei verschiedenen Werkstoffen

POST-PROCESSING VON GEDRUCKTEN BAUTEILEN

- Post-Processing beschreibt alle erforderlichen Schritte zur Erzielung geforderter Qualität und Eigenschaften von additiv gefertigten Bauteilen. Häufig ist eine nachträgliche Bearbeitung der Bauteile mittels verschiedener Folgeprozesse erforderlich, die nach dem eigentlichen additiven Prozess betrieben werden müssen.
- Post-Processing besteht in der Regel aus Arbeitsschritten zur Reinigung, Entfernung der Stützstrukturen und Oberflächen-Nachbehandlung.
- Post-Processing gestaltet sich in Abhängigkeit vom verwendeten Werkstoff und Verfahren, sowie Komplexität der Bauteile und Genauigkeitsanforderungen unterschiedlich.



POST-PROCESSING BEI EINZELNEN VERFAHREN

Verfahren	Entfernung von Ausgangsmaterial	Entfernung von Supports	sonstige
Stereolithografie	✓	✓	Aushärten
Laser-Sintern	✓	✗ Pulver entfernen	
Fused Layer Modeling	✗	✓	
Poly Jet Modeling	✗	✓	
Multi Jet Modeling	✗	✓	
3D-Printing	✓	✗ Pulver entfernen	Tränken/ Infiltrieren
Strahlschmelzen (LBM + EBM)	✓	✓	
LLM	✓	✓ Zuschnitte entfernen	

NOTWENDIGKEIT DER FOLGEPROZESSE

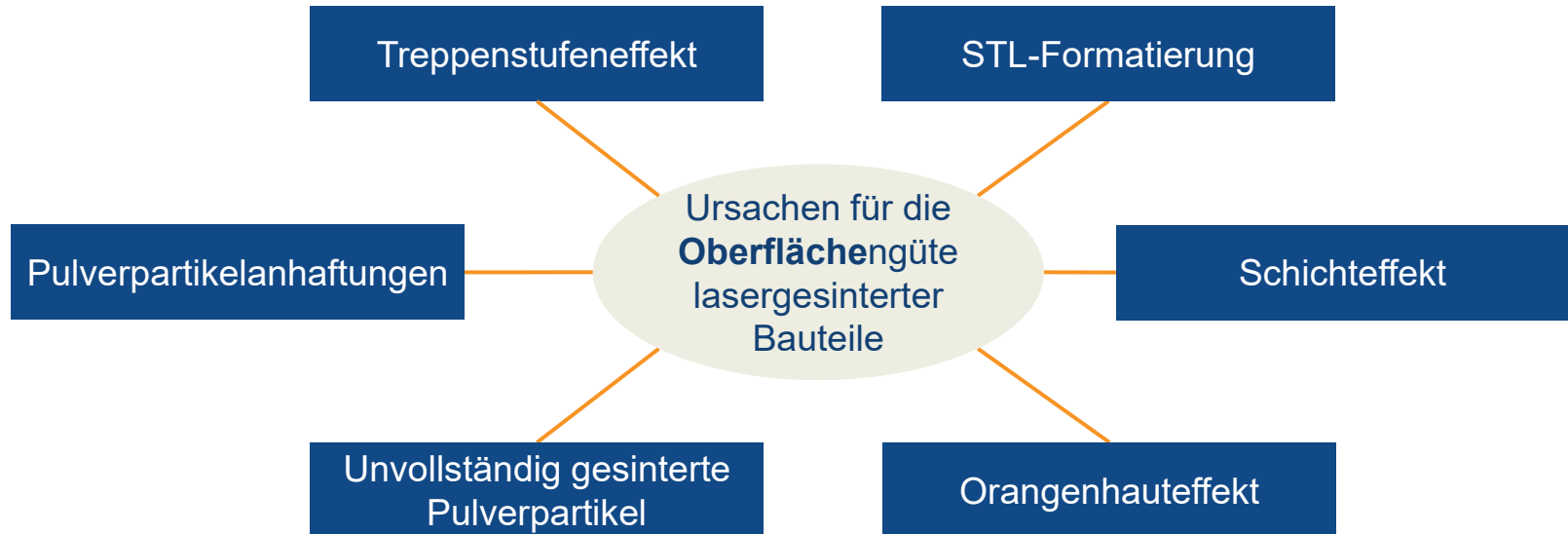
Da additiv hergestellte Bauteile viele Anforderungen des finalen Bauteils, wie z.B.

- Optik
- Haptik
- Oberflächenqualität

oftmals nicht ausreichend erfüllen können, kommen verschiedene Nachbehandlungen / Folgetechnologien zum Einsatz.

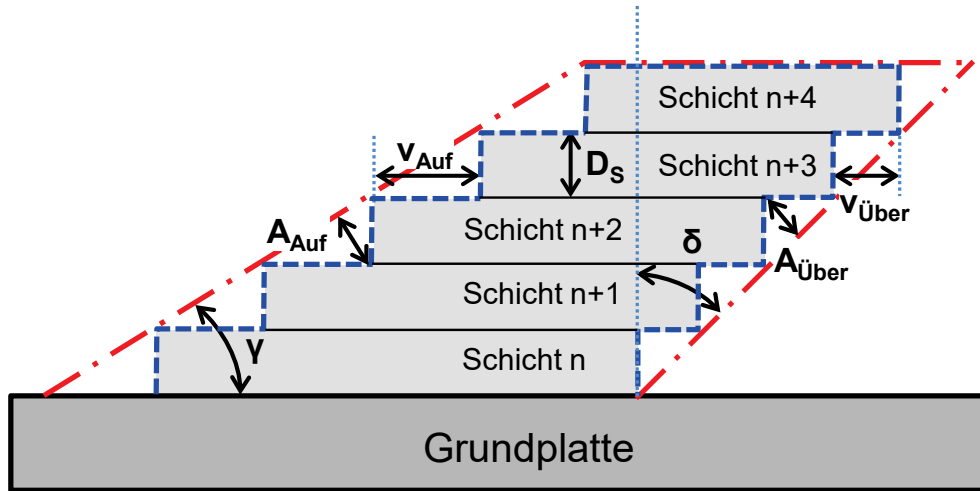
QUALITÄTSMERKMALE

Prozessspezifische Erscheinungen der Bauteiloberflächen am Beispiel des Prozesses Laser-Sintern



TREPPENSTUFENEFFEKT

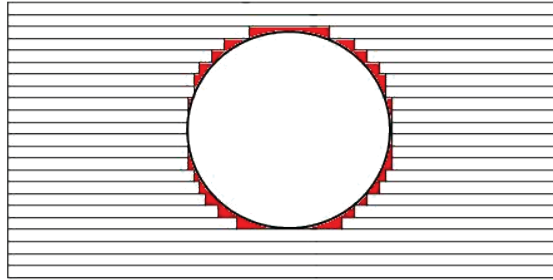
- Treppenstufeneffekt tritt vor allem bei schrägen und runden Bauteilkonturen auf
- Schräge Bauteilkonturen möglichst in Schichtebene legen, Bohrungen senkrecht stellen



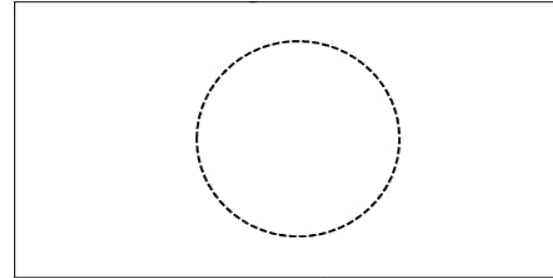
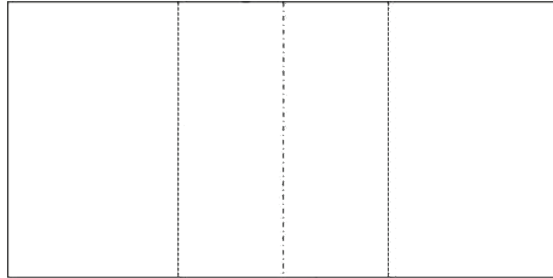
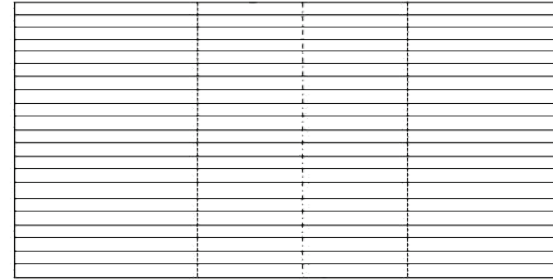
- γ : Aufbauwinkel
- δ : Überhangwinkel
- D_s : Schichtdicke
- v_{Auf} : Versatz Aufbau
- $v_{Über}$: Versatz Überhang
- A_{Auf} : Abweichung Aufbau
- $A_{Über}$: Abweichung Überhang
- - : Solloberfläche
- - - : Istoberfläche

TREPPENSTUFENEFFEKT

Bohrung quer zu den Schichten



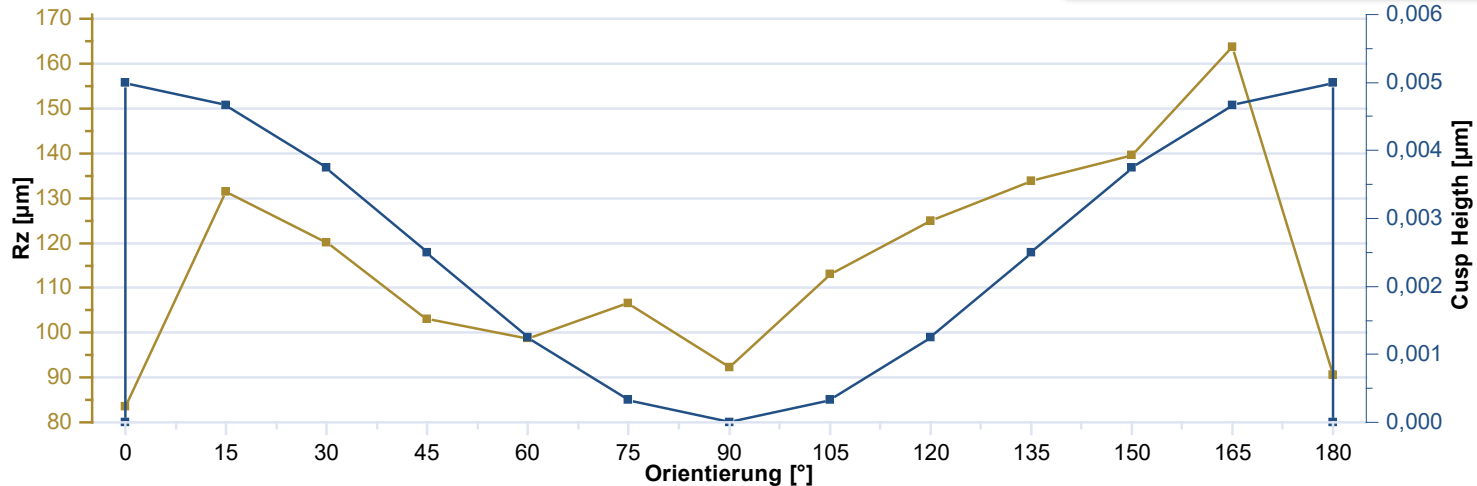
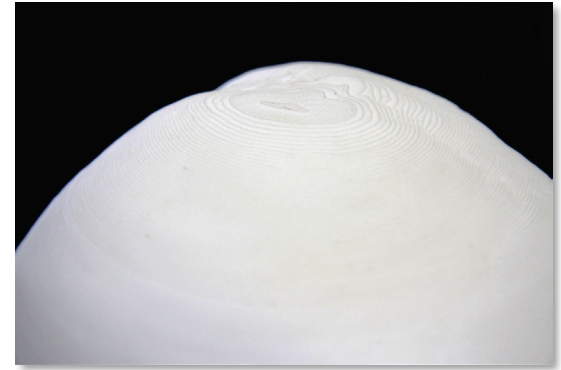
Bohrung in Schichtebene



TREPPENSTUFENEFFEKT

Orientierungsabhängigkeit lasergesinterter Bauteiloberflächen

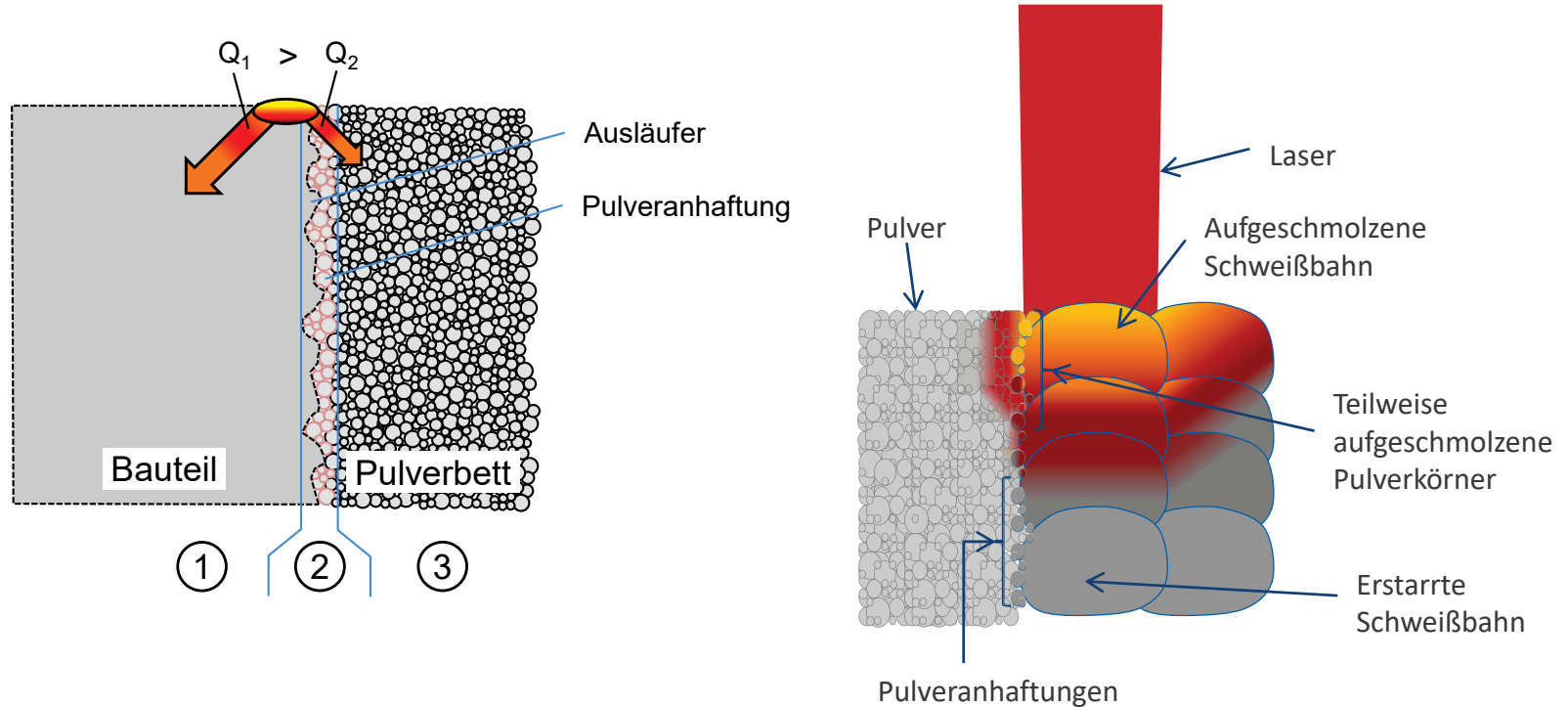
- Verfahrensbedingte Anisotropie der Bauteile
- Zunehmende Komplexität und eine erhöhte Bauteilanzahl erschweren eine optimierte Orientierung
- Rauheit zwischen 80 μm - 170 μm



PULVERANHAFTUNGEN UND SCHMELZAUSLÄUFER

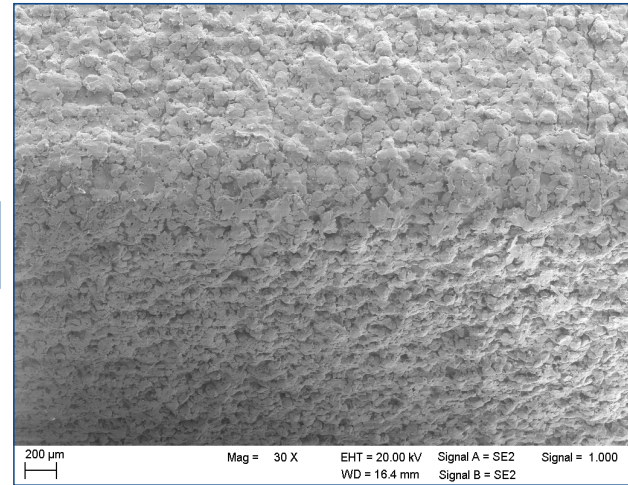
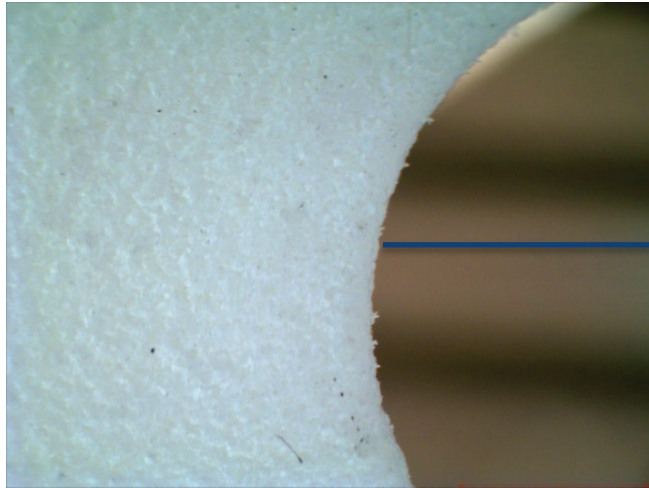
- Bei Belichtung werden auch Bereiche neben und unter der Schweißbahn aufgeschmolzen
- Wärmeleitung in das Pulverbett ist um ca. 3 Größenordnungen kleiner als die Wärmeleitung in das Bauteil
- Im Übergangsbereich reicht die Wärmeleitung jedoch aus, um Pulverpartikel unvollständig aufzuschmelzen und mit dem Bauteil zu versintern

PULVERANHAFTUNGEN UND SCHMELZAUSLÄUFER



PULVERANHAFTUNGEN UND SCHMELZAUSLÄUFER

- Unkontrolliertes Wachsen der Geometrie durch Wärmeleitungseffekte
- Erreichbare Oberflächengüte wird durch die geometrischen Merkmale des Ausgangspulvers limitiert



SCHICHTEFFEKT

Komplexes dreidimensionales Packungsproblem durch die Möglichkeit Bauteile über- bzw. ineinander zu verschachteln

- Unterschiedliche Belichtungsflächen und Belichtungszeiten
- Durch unterschiedliche Verweilzeiten kühlen die Schichten in individueller Länge ab
- Inhomogenes Verzugsverhalten



FAZIT POST-PROCESSING-SCHRITTE

- Entfernen von Pulveranhaftungen
 - Abtrennen von Bauplattform (ggf. Überarbeitung)
 - Entfernen von Supportstrukturen
 - i.d.R. Oberflächenfinish
-
- ➔ „AM's dirty little secret“
 - ➔ Teilweise mehr als 1/3 der Kosten

AUFBAU DER VORLESUNG: PLANUNG DER PROZESSE

7.2.2	Planung von In-Processing in der Additiven Fertigung	
	Materialaufbereitung	
	7.2.2.1	Materialbereitstellen
	7.2.2.2	Materialrückführung
7.2.3	Post-Processing	
	7.2.3.1	Notwendigkeit der Folgeprozesse
	7.2.3.2	Post-Processing bei verschiedenen Werkstoffen

Fertigungsplanung in der Additiven Fertigung

IN DER POST-PROCESSING EINGESetzte MANUELLE ARBEITSSCHRITTE



Auspacken aus
Pulverkuchen



Entfernen von Stützen



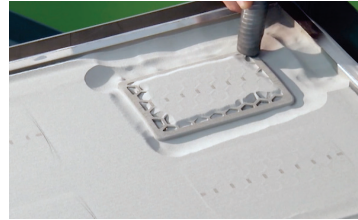
Strahlen



Beseitigen der
Materialrückstände

INFILTRIEREN VON METALLISCHEN BAUTEILEN (BINDER JETTING)

- Durch das Infiltrieren werden mit Binder Jetting hergestellte, poröse Druckteile aus Metall in ein vollständig massives Bauteil überführt.
- Das Infiltrat, das eine niedrige Schmelztemperatur hat, wird zusammen mit dem Druckteil erhitzt. Somit drängt das flüssige Infiltrat in die Poren des Druckteiles und benetzt die feste Phase.
- Das Infiltrieren kommt hauptsächlich nach 3DP und SLS Verfahren als Post-Process zum Einsatz.
- Metallische Bauteile werden oft mit Bronze infiltriert.
- Infiltrieren von SLS-Kunststoffbauteilen durch Aufbringen von Epoxid-Harz und anschließenden Aushärten verbessert Produkteigenschaften wie Stabilität, Steifigkeit und Feuchtigkeitsresistenz.



Infiltrationsprozess



POST-PROCESSING DER BAUTEILE AUS PHOTOPOLYMEREM WERKSTOFF



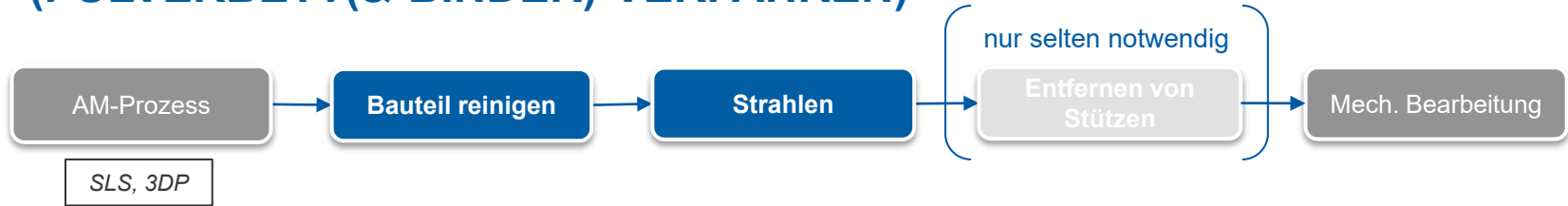
- Nach dem Bauprozess erfolgt die Reinigung des Bauteiles mittels Isopropanol oder Aceton und die anschließende Entfernung des Lösungsmittel durch Spülen mit Wasser.
- Die Bauteile erhalten danach erst nach der Aushärtung in einer speziellen UV-Belichtungskammer ihre Endfestigkeit (Durchhärten/Durchvernetzen).
- Je nach den Anforderungen an die Bauteileigenschaften werden die Stützstrukturen vor oder nach der Aushärtung entfernt.

POST-PROCESSING DER BAUTEILE AUS KUNSTSTOFF (SCHMELZEN UND VERFESTIGEN)



- Nach dem Bauprozess erreichen die Bauteile in der Regel die Endfestigkeit.
- Die Stützstruktur wird manuell entfernt. Der Einsatz von spröderem Werkstoff für die Stützkonstruktion ermöglicht es, sie ohne Beschädigung des Bauteiles und ohne Werkzeuge durch Abbrechen manuell zu entfernen. Bei wasserlöslichen Stützmaterialien werden die Bauteile gewaschen, wodurch sich der Support auflöst.
- Um die Oberfläche anzulösen und somit zu glätten, wird empfohlen die Bauteile aus (geeignetem!) Kunststoff (z.B. ABS) in einem Aceton-Bad zu bedampfen. Achtung: Genauigkeitsverlust möglich!

POST-PROCESSING DER BAUTEILE AUS KUNSTSTOFF (PULVERBETT(&-BINDER)-VERFAHREN)



- Nach dem Bauprozess werden die Teile zuerst im Bauraum ausgekühlt und danach vorsichtig vom Pulverkuchen manuell befreit.
- Im nächsten Schritt werden die Teile in einer Auspackstation manuell oder maschinell abgeblasen. Die leicht angesinterten Bereiche (Pelze) sind mittels Werkzeugen zu entfernen.
- Die Reinigung von gedruckten Teilen mit inneren Hohlräumen, Bohrungen und feinen Details ist mit großem Aufwand verbunden.
- Für die Stabilität vorgesehene Stützen können am Ende des Post-Processing entfernt werden.

POST-PROCESSING DER BAUTEILE AUS METALL (PULVERBETT-VERFAHREN)



- Nach dem Bauprozess werden die Teile zuerst im Bauraum ausgekühlt und danach vorsichtig vom Pulverkuchen manuell befreit.
- Im nächsten Schritt werden die Teile von der Bauplattform getrennt und Support-Strukturen entfernt.
- Oft erfolgt (wenn keine weitere mech. Bearbeitung notwendig) ein Glätten der Oberfläche durch Strahlen
- Die Reinigung von gedruckten Teilen mit inneren Hohlräumen, Bohrungen und feinen Details ist mit großem Aufwand verbunden.



Fertigungsplanung in der Additiven Fertigung

Fertigungsplanung in der Additiven Fertigung 2021 – 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

