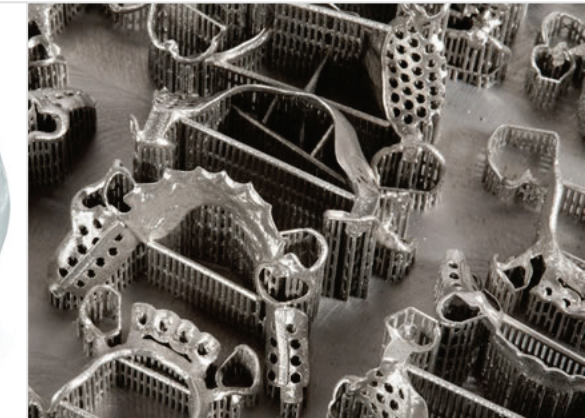
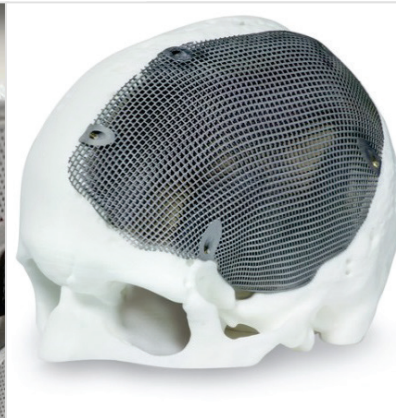
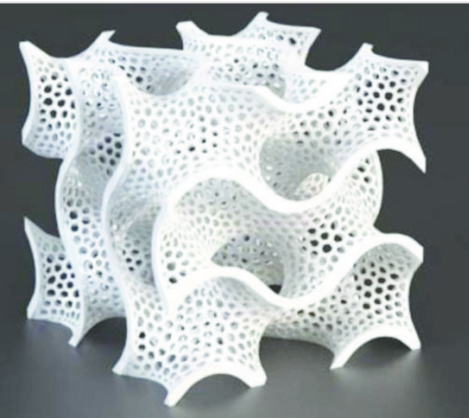


# ADDITIVE FERTIGUNG



Sommersemester 2021

# GLIEDERUNG

1. Einführung in das Thema additive Fertigungstechnik
2. Produktentstehungsprozess
3. Modelle und Prototypen in der Produktentwicklung
4. Klassifizierung
5. Preprocessing (Datenaufbereitung, Datennutzung)
6. Additive Fertigungsverfahren
7. **Postprocessing**
8. **Wirtschaftlichkeit**

## 7 Postprocessing

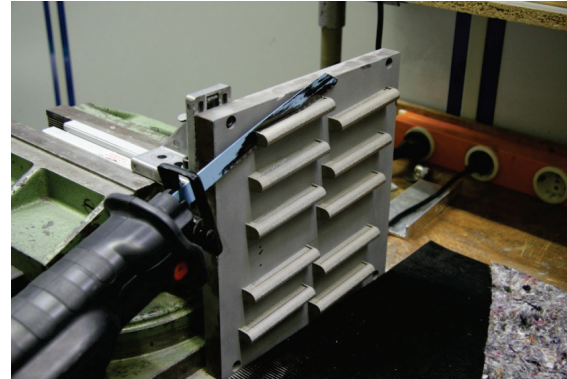
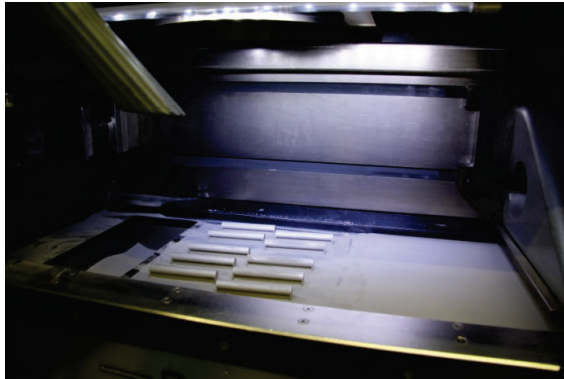
# NACHBEARBEITUNGSBEDARF

Verfahren	Entfernung von Ausgangsmaterial	Entfernung von Supports	Sonstige
Stereolithographie / DLP / CLIP	Ja	Ja	Aushärten
Selektives Laser-Sintern	Ja	Nicht nötig	
Fused Layer Modeling	Nicht nötig	Ja	ggf. Multimaterial
Multi Jet Modeling / Poly Jet Fusion	Nicht nötig	Ja	PJF ggf. Aushärten
Binder Jetting	Ja	Nicht nötig	ggf. Infiltrieren, Sintern
Strahlschmelzen (LBM + EBM)	Ja	Ja	ggf. Wärmebehandeln
DED (LMD, WAAM)	Nicht nötig	Entfernen von Bauplattform	Endform (spanend) schaffen

## 7 Postprocessing

# NACHBEARBEITUNG LBM-BAUTEILE

- Nicht verschmolzenes Pulver wird entfernt (i.d.R. Absaugen in Sieb-/Aufbereitungseinheit)
- Bauplattform wird dem Prozessraum entnommen
- Bauteile werden von der Bauplattform abgetrennt (manuell oder halbautomatisiert mit Bandsäge oder WEDM)
- Verbleibende Supportstrukturen müssen mechanisch (i. d. R. durch manuelles Abtrennen mit Sägen, Hammer, Zangen... ) entfernt werden



## 7 Postprocessing

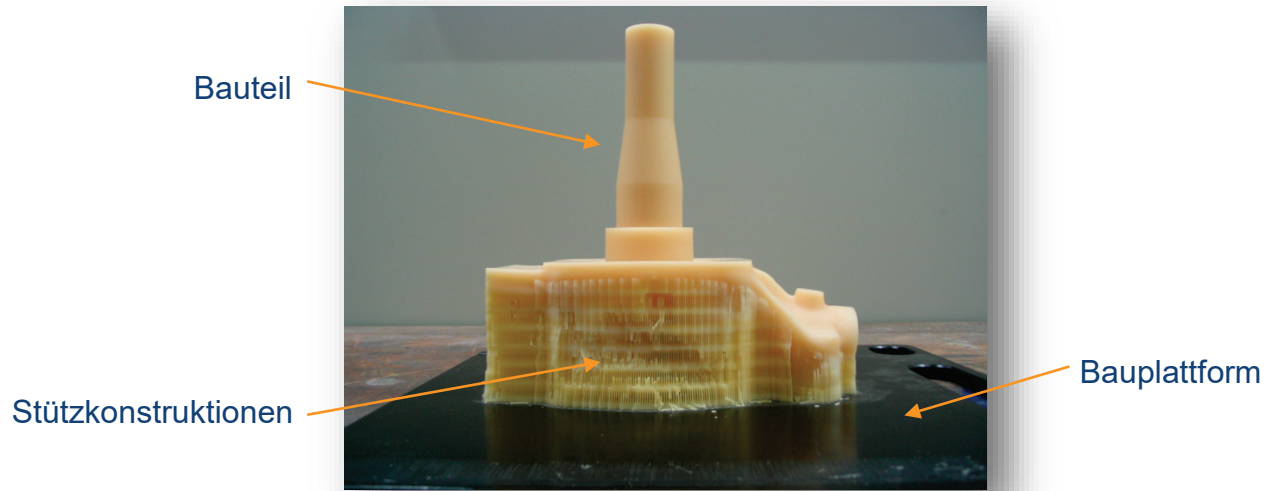
# NACHBEARBEITUNG SLS-BAUTEILE

- Bauteile werden (mit anhaftendem Pulver) entnommen
- In einer Auspackstation werden die Bauteile aus dem Pulverkuchen entfernt
  - Loses Pulver von Bauteil abbürsten oder mit Druckluft abblasen
- Pulver fällt zunächst durch ein Grobsieb in den Rütteltrichter
  - Pulver, das hier hindurch fällt, kann i.d.R. wieder verwendet werden (Mischung Altpulver+Neupulver)
- Restliches hartes Pulver wird entsorgt



# NACHBEARBEITUNG MJM-BAUTEILE

- Insgesamt aufwendige Nachbearbeitung, da bei weichen Wachsmaterialien die Stützkonstruktionen sehr sorgsam entfernt werden müssen
- Bei Monomaterial: Supportstrukturen hinterlassen oft deutlich sichtbare Spuren auf der Bauteiloberfläche
- Multimaterial-Supportstrukturen können durch definierte Erwärmung selektiv entfernt werden



## 7 Postprocessing

# NACHBEARBEITUNG FLM-BAUTEILE

- Lösen von Bauplattform: i.d.R. mechanisches „Abbrechen“ (ggf. auch vom Raft)
- Entfernen von Support (wenn vorhanden):
  - Monomaterial: mechanisches Entfernen (i.d.R. manuell mit Zange)
  - Multimaterial: Auswaschen des verbauten Stützmaterials mit einer basischen Lösung als Reinigungs- und Lösungsmittel in einer Reinigungsstation

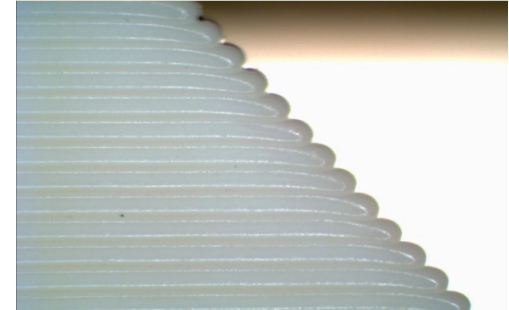
Supportstrukturen



Wellige und unebene Struktur in xy-Ebene



Treppenstufeneffekt in z-Richtung



## 7 Postprocessing

# NOTWENDIGKEIT DER FOLGEPROZESSE

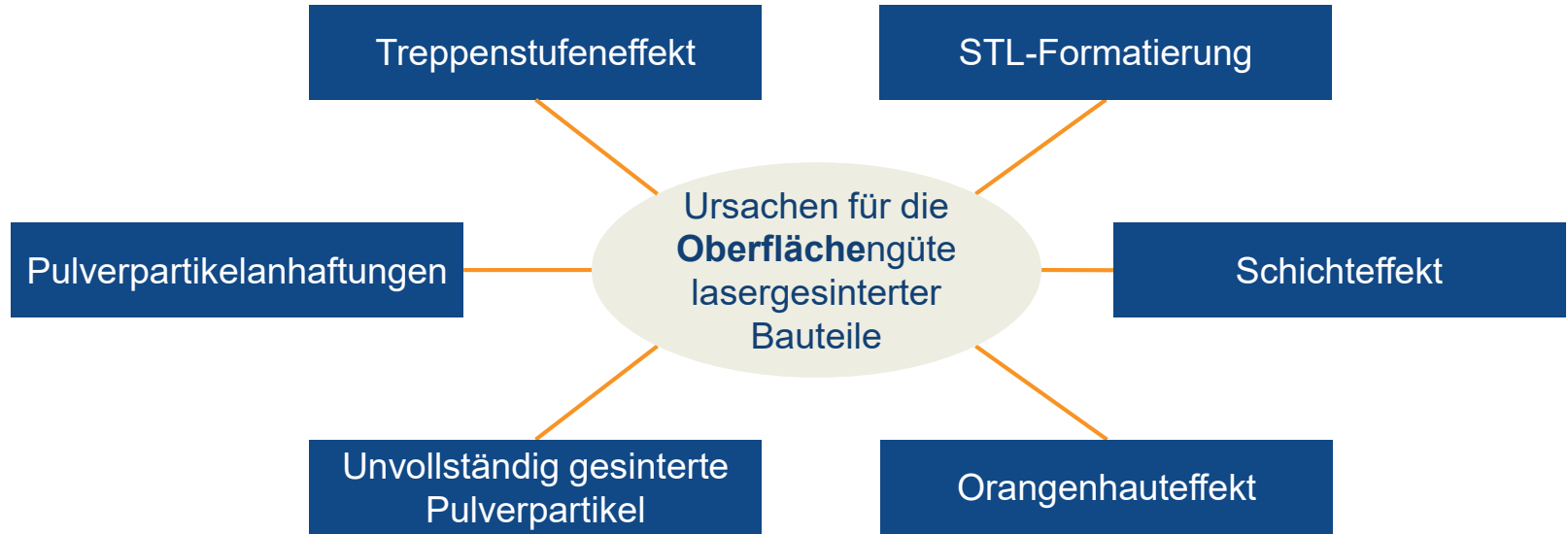
Da additiv gefertigte Bauteile Anforderungen an das finale Teil, wie z.B.

- Optik
- Haptik
- Oberflächenqualität
- enge geometrische Toleranzen

oftmals unmittelbar nach dem AM-Prozess nicht ausreichend erfüllen können, kommen verschiedene, prozess- und anwendungsspezifische Nachbehandlungen / Folgetechnologien zum Einsatz.

# QUALITÄTSMERKMALE

Prozessspezifische Bauteiloberflächen am Beispiel des Prozesses Laser-Sinterns



## 7 Postprocessing

# HERAUSFORDERUNG: OBERFLÄCHENFINISH

- Tatsächliche Zielgröße bislang undefiniert (viele Richtwerte der Konstruktion basieren auf Erfahrungen mit konventioneller Fertigung und deren kinematischer Rauheit)
- Raue Oberfläche bei vielen Verfahren (eine Ursache: Partikelform des Ausgangsmaterials)
- Welligkeit / kinematische Rauheit in Z durch schichtweisen Aufbau
- Zugänglichkeit für Finish-Verfahren bei komplexen Strukturen schwierig



Quelle: BTE, IWU, IWT, DMG, burloaktech

# AM OBERFLÄCHEN

Pulverbasiert
Fein
Flach/scharfkantig
Angeschmolzenes Material, Pulveranhaftung
Hochfrequente 2D Rauheit

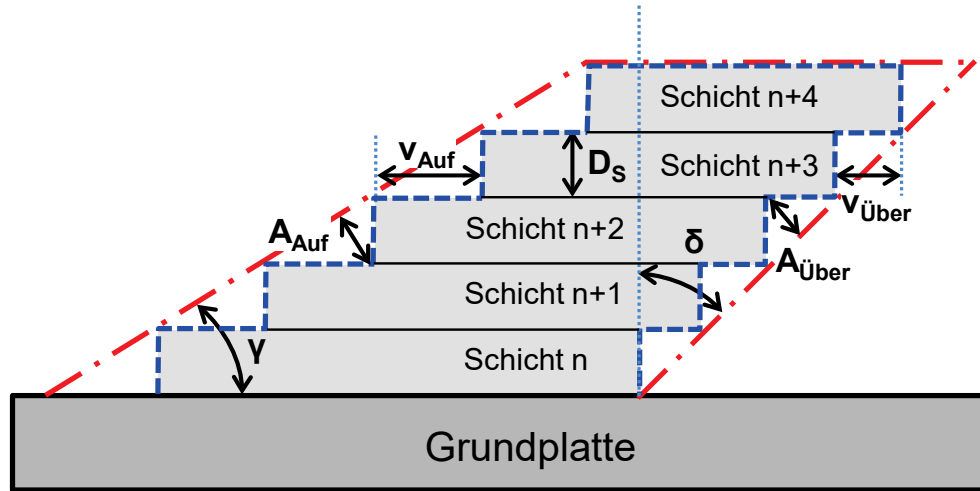
Schichtdicke  
 Schichtrand  
 Einflussfaktoren  
 Anmutung

Drahtbasiert
Grob
Abgerundet
Ablagerate, Poren, Zusammensetzung
Niederfrequente 1D Welligkeit



# TREPPENSTUFENEFFEKT

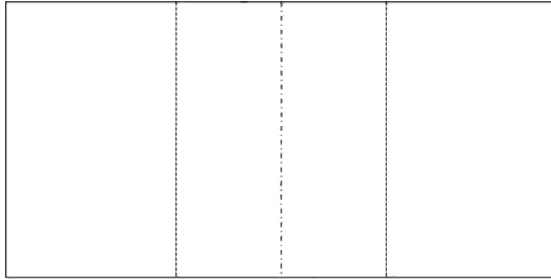
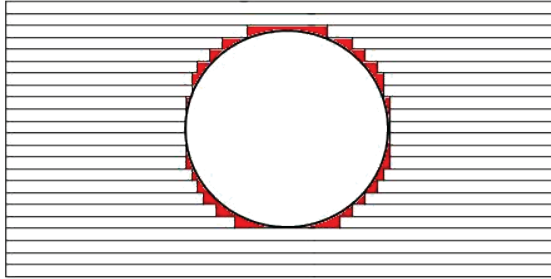
- Treppenstufeneffekt tritt vor allem bei schrägen und runden Bauteilkonturen auf
- Best practice: schräge und runde Bauteilkonturen möglichst in Schichtebene legen



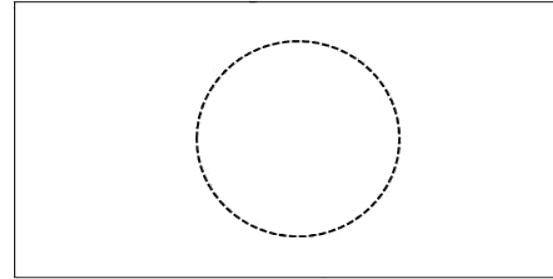
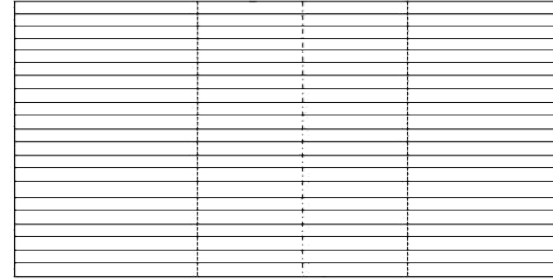
$\gamma$	: Aufbauwinkel
$\delta$	: Überhangwinkel
$D_s$	: Schichtdicke
$v_{Auf}$	: Versatz Aufbau
$v_{Über}$	: Versatz Überhang
$A_{Auf}$	: Abweichung Aufbau
$A_{Über}$	: Abweichung Überhang
- . -	: Solloberfläche
- - -	: Istoberfläche

# TREPPENSTUFENEFFEKT

Bohrung quer zu den Schichten



Bohrung in Schichtebene

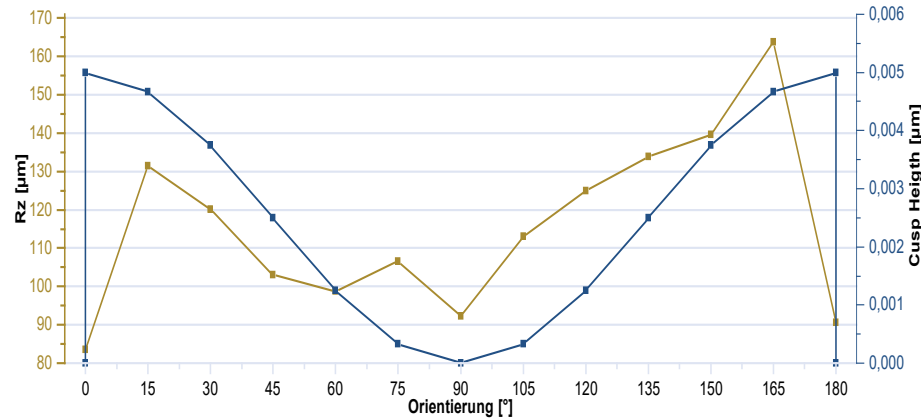
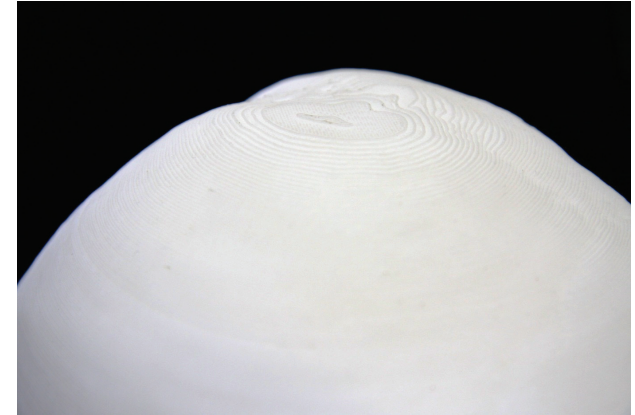


## 7 Postprocessing

# TREPPENSTUFENEFFEKT

### Orientierungsabhängigkeit lasergesinterter Bauteiloberflächen

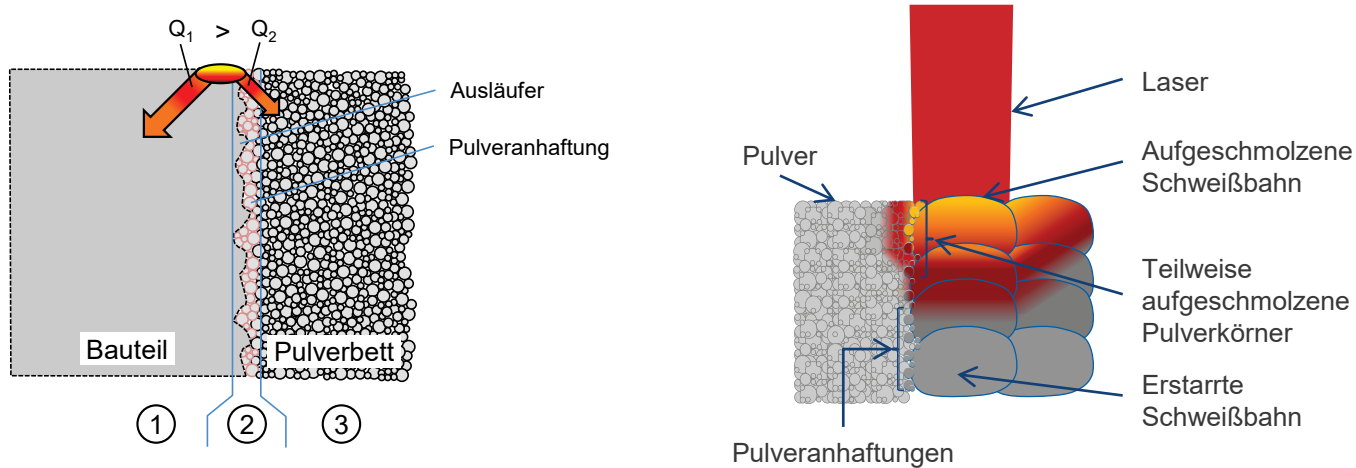
- Verfahrensbedingte Anisotropie der Bauteile
- Zunehmende Komplexität und eine erhöhte Bauteilanzahl erschweren eine optimierte Orientierung
- Rauheit zwischen 80  $\mu\text{m}$  - 170  $\mu\text{m}$



## 7 Postprocessing

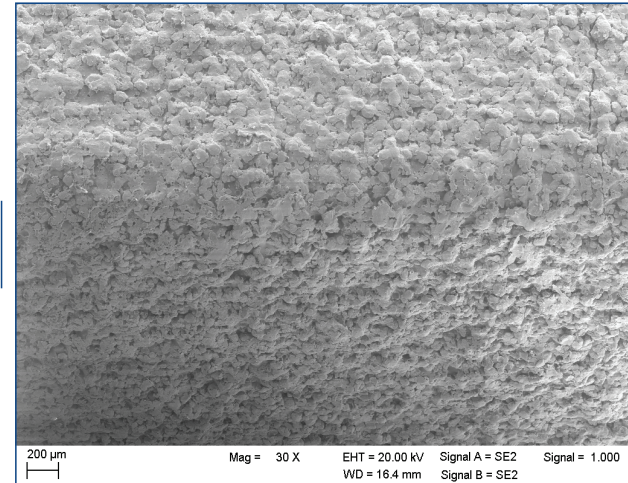
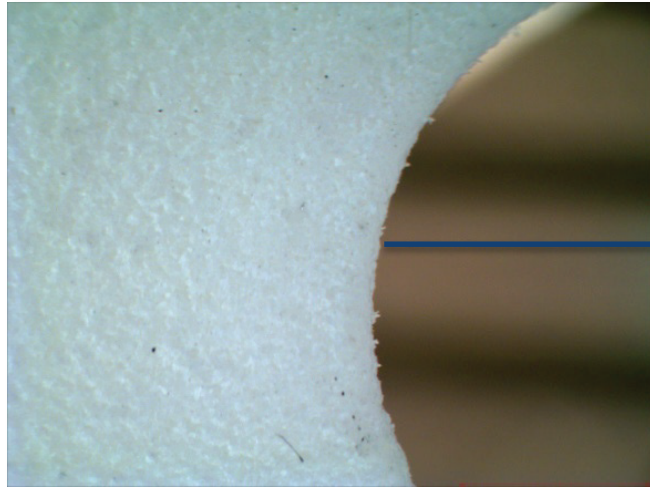
# PULVERANHAFTUNGEN UND SCHMELZAUSLÄUFER

- 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

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

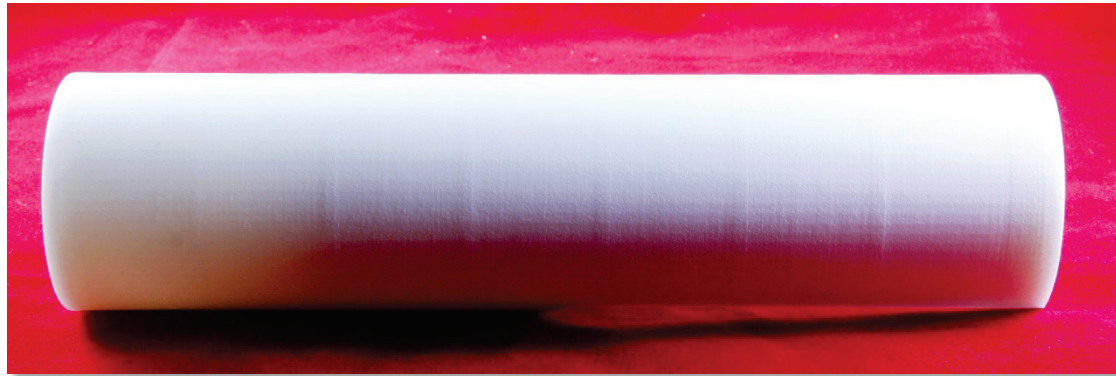


## 7 Postprocessing

# SCHICHTEFFEKT

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

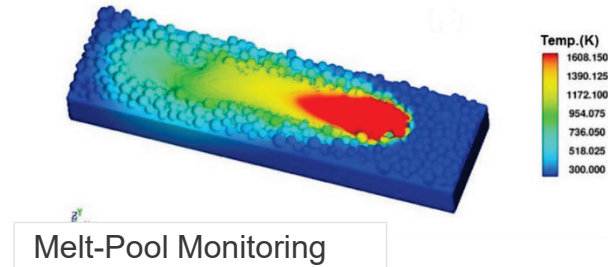
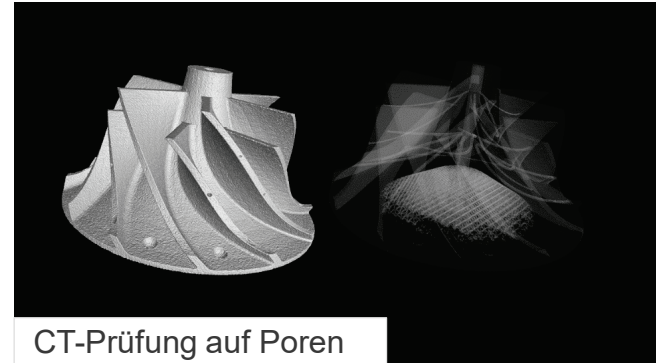
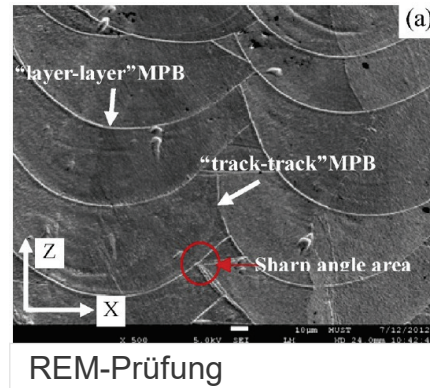
- Unterschiedliche Belichtungsflächen und Belichtungszeiten
- Durch unterschiedliche Verweilzeiten kühlen die Schichten in individueller Länge ab
- Inhomogenes Verzugsverhalten



## 7 Postprocessing

# QUALITÄTSSICHERUNG

- Prüfen auf Poren
- Gefügeanalyse
- **Reproduzierbarkeit**
- Prozessstabilität



## 7 Postprocessing

# FAZIT NACHBEARBEITUNGSSCHRITTE

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

## 7 Postprocessing

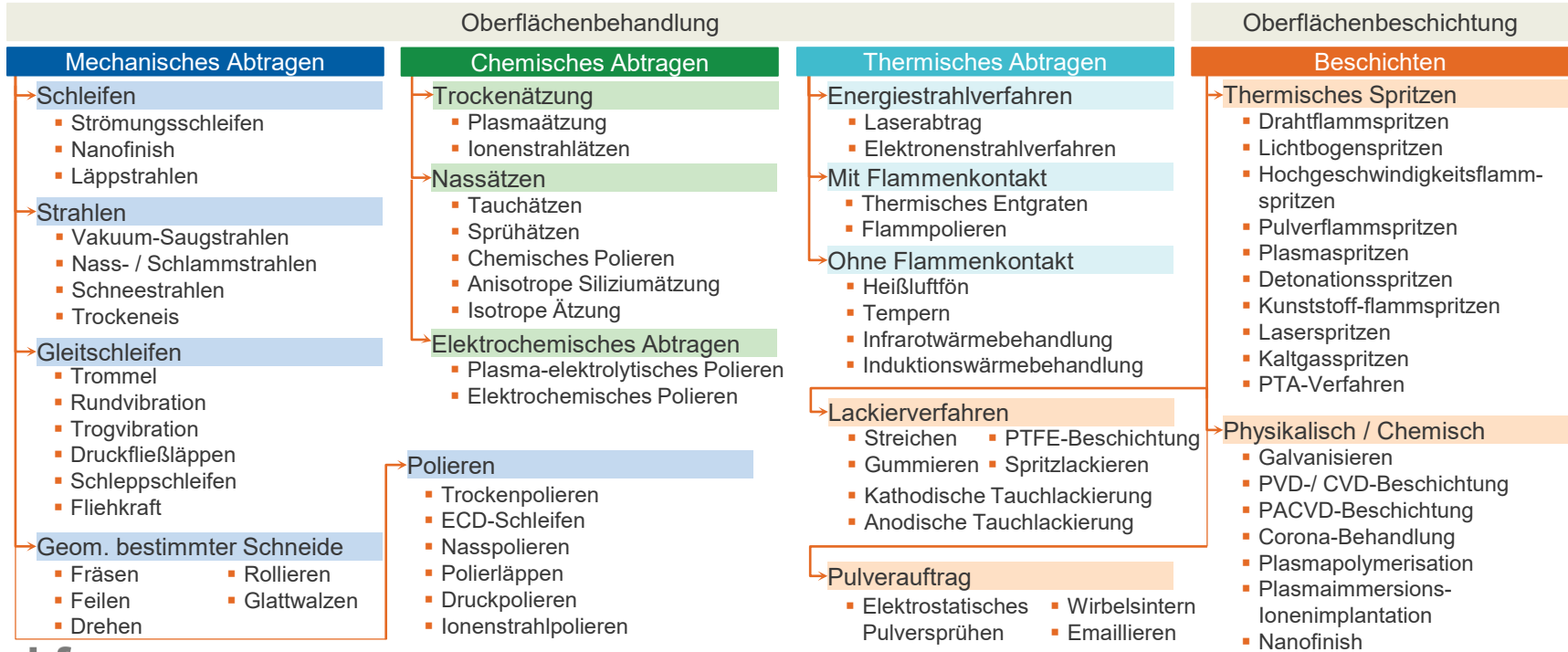
# OBERFLÄCHENBEARBEITUNGSVERFAHREN

Nach DIN 8580 werden die Fertigungsverfahren in 6 Hauptgruppen eingeteilt.

- Eine Verbesserung der Oberflächenqualität ist durch Verfahren der Hauptgruppen 3 und 5 zu erreichen.

Schaffen der Form	Ändern der Form			Ändern der Stoffeigenschaften	
Zusammenhalt schaffen	Zusammenhalt beibehalten	Zusammenhalt vermindern	Zusammenhalt vermehren		
Hauptgruppe 1	Hauptgruppe 2	<b>Hauptgruppe 3</b>	Hauptgruppe 4	<b>Hauptgruppe 5</b>	Hauptgruppe 6
Urformen	Umformen	<b>Trennen</b>	Fügen	<b>Beschichten</b>	Stoffeigenschaften ändern

# EINTEILUNG DER NACHBEARBEITUNGSVERFAHREN



## 7 Postprocessing

# AUSWAHLKRITERIEN

Die Auswahl geeigneter Verfahren zur Oberflächenbearbeitung additiv gefertigter Bauteile richtet sich nach den Faktoren:



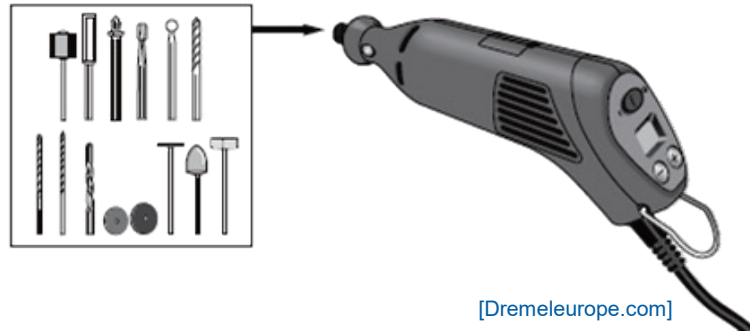
# AUSWAHLKRITERIEN

	Zeit	Kosten	Effizienz	Geom. Komplexität
Mechanische Oberflächenbearbeitung	-	+	+	-
Physikalisch – chemische Verfahren	0/+	0	0/+	+
Beschichtungsverfahren	0	0	+	+
Chemische nicht schichtbildende Verfahren	-	+	-	0

## 7 Postprocessing

# MECHANISCHE NACHBEARBEITUNGSVERFAHREN - MANUELLES SCHLEIFEN UND POLIEREN

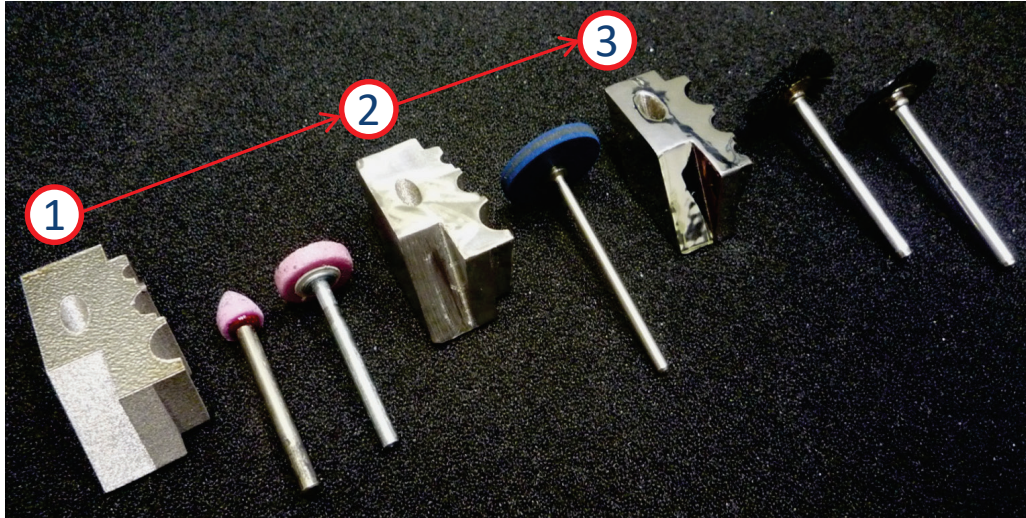
- Schleifen und Polieren wird nach DIN 8580 der Hauptgruppe 3 Trennen zugeordnet
- Bearbeitung mit rotierenden Handschleifgeräten wird der Untergruppe 3.3.1 (DIN 8580 – 11) zugeordnet
- Materialabtrag durch Relativbewegung zwischen rotierendem Schleif- bzw. Polieraufsatz und ruhendem Werkstück
- Schleif- und Polieraufsätze in verschiedenen Formen und Körnungen
- Stufenweise Bearbeitung von grober Körnung zu feinen Körnung
- Bearbeitung mit sehr feinen Körnungen ( $\varnothing$  1 – 20  $\mu$ m) durch Einsatz von Politurpasten möglich



[Dremeurope.com]

7 Postprocessing

# MECHANISCHE NACHBEARBEITUNGSVERFAHREN - MANUELLES SCHLEIFEN UND POLIEREN



1: Ausgangszustand, Bauteil gestrahlt

→ 2: Erste Schleifbearbeitung mit groben Schleifköpfen

→ 3: Bauteil nach erfolgter Politur

## 7 Postprocessing

# MECHANISCHE NACHBEARBEITUNGSVERFAHREN - MANUELLES SCHLEIFEN UND POLIEREN

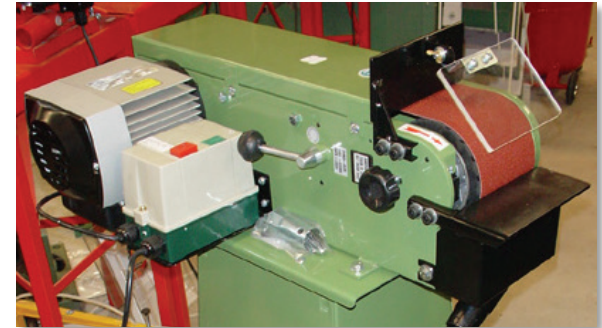
### Einstellparameter

#### Schleifverhalten

- Schnittgeschwindigkeit
- Spandicke
- Dauer
- Wirkfläche des Schleifkörper
- Spantemperatur

#### Körnung

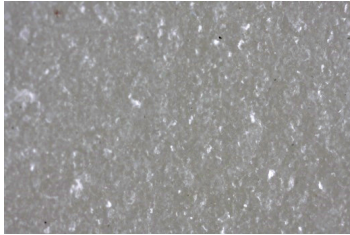
- |                               |          |
|-------------------------------|----------|
| ▪ Farbentfernung/Grobschliff: | P40-60   |
| ▪ Anschleifen:                | P80-120  |
| ▪ Zwischenschliff:            | P150-220 |
| ▪ Endschliff:                 | P240-400 |



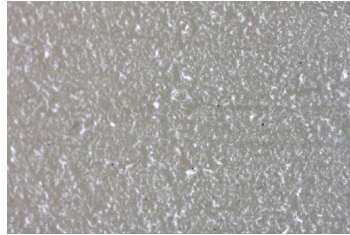
7 Postprocessing

# MECHANISCHE NACHBEARBEITUNGSVERFAHREN - MANUELLES SCHLEIFEN UND POLIEREN

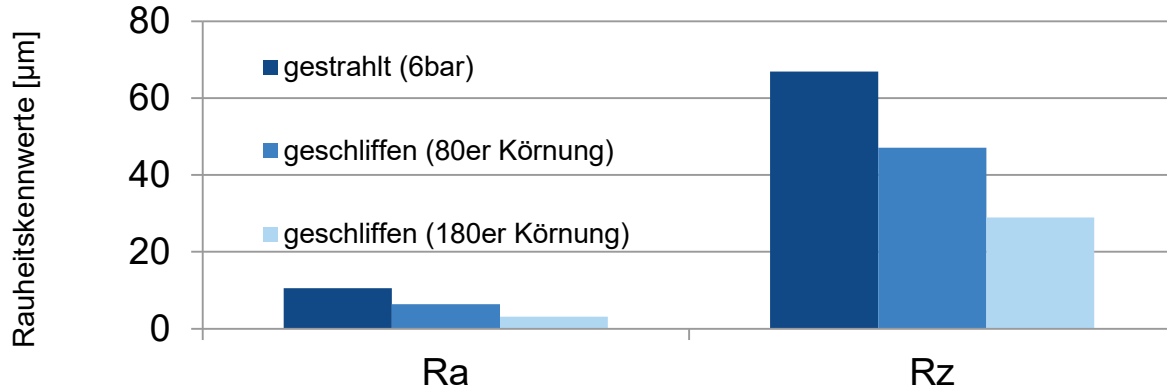
Gestrahlt (6bar)



Geschliffen (80er Körnung)



Geschliffen (180er Körnung)



## 7 Postprocessing

# MECHANISCHE NACHBEARBEITUNGSVERFAHREN - MANUELLES SCHLEIFEN UND POLIEREN

### Vorteile:

- + Günstig
- + Schnell
- + Hohe Oberflächenqualität, glänzende und spiegelnde Oberflächen erreichbar
- + Hohe Flexibilität
- + Für Einzelteillfertigung geeignet
- + Weit verbreitetes Verfahren

### Nachteile:

- Geometrieabhängigkeit
- Hinterschnitte schlecht / gar nicht erreichbar
- Keine Serienfertigung möglich
- Großer Zeitaufwand, da Bearbeitung in mehreren Schritten notwendig
- Unebenheiten auf Flächen und Rundungen, da manuelles Verfahren

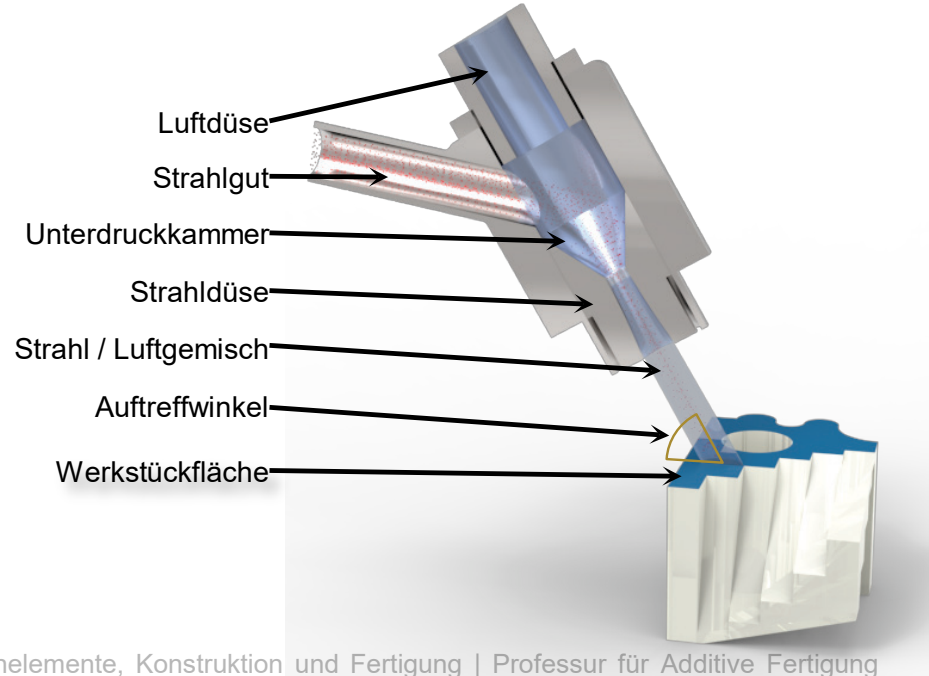
7 Postprocessing

# MECHANISCHE NACHBEARBEITUNGSVERFAHREN - STRAHLEN

Unterteilung der Strahlverfahren

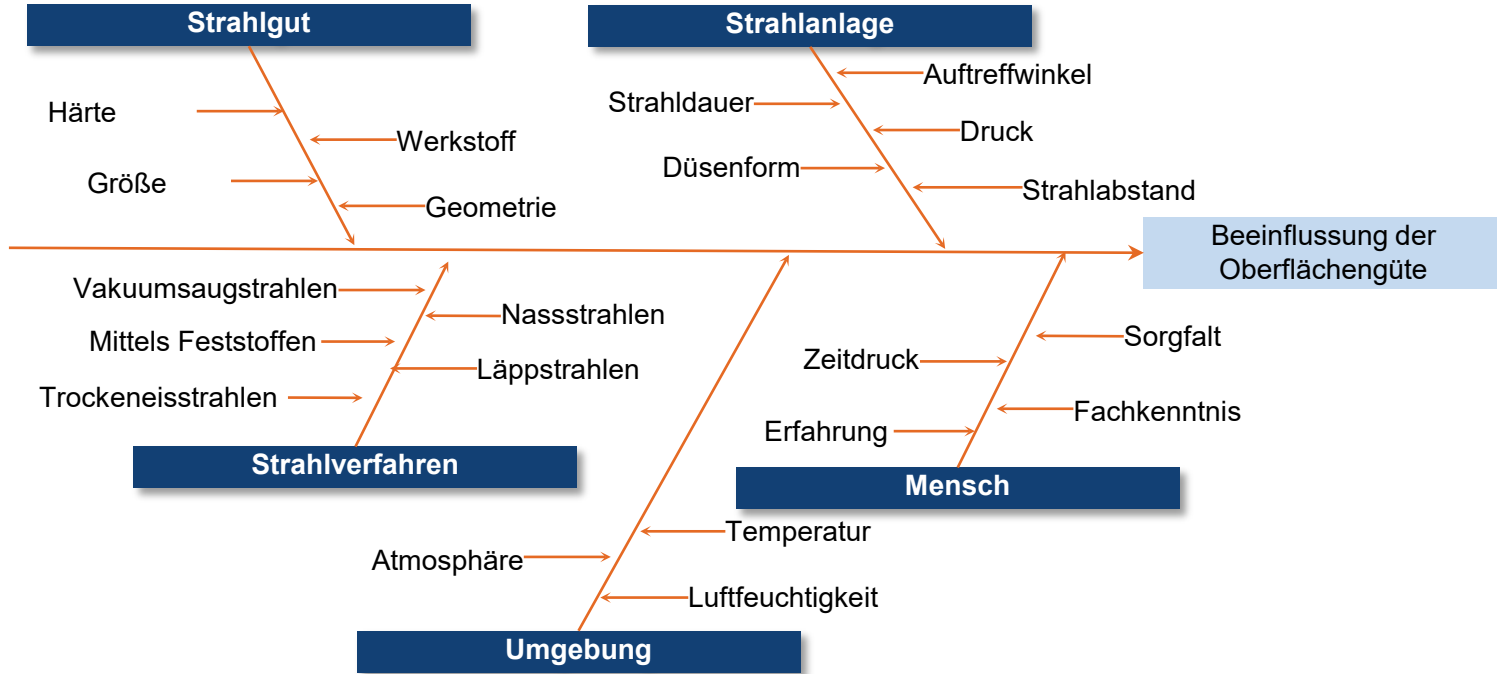
- Strahlen mittels Feststoffen
- Strahlen mittels Trockeneis
- Nassstrahlen
- Vakuumsaugstrahlen
- Lämpstrahlen

Strahlen mittels Feststoffen



7 Postprocessing

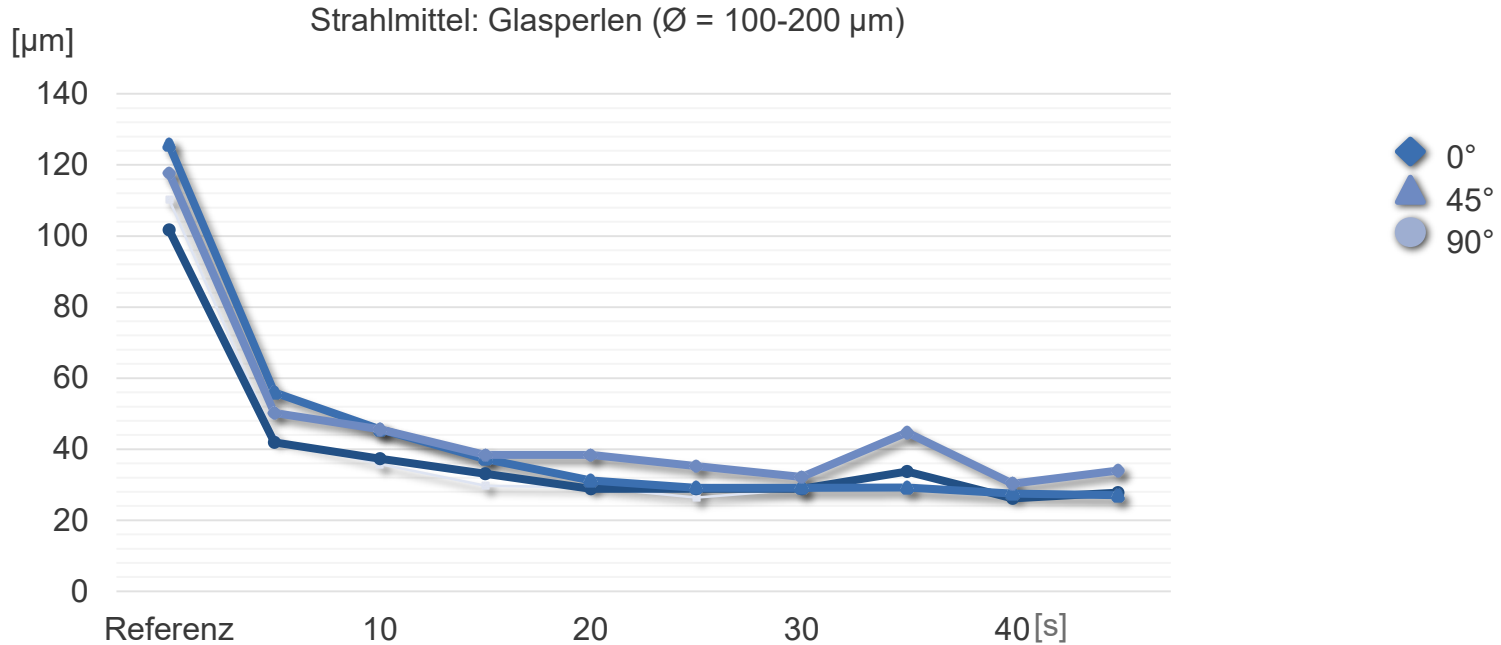
# MECHANISCHE NACHBEARBEITUNGSVERFAHREN - STRAHLEN



7 Postprocessing

# MECHANISCHE NACHBEARBEITUNGSVERFAHREN - STRAHLEN

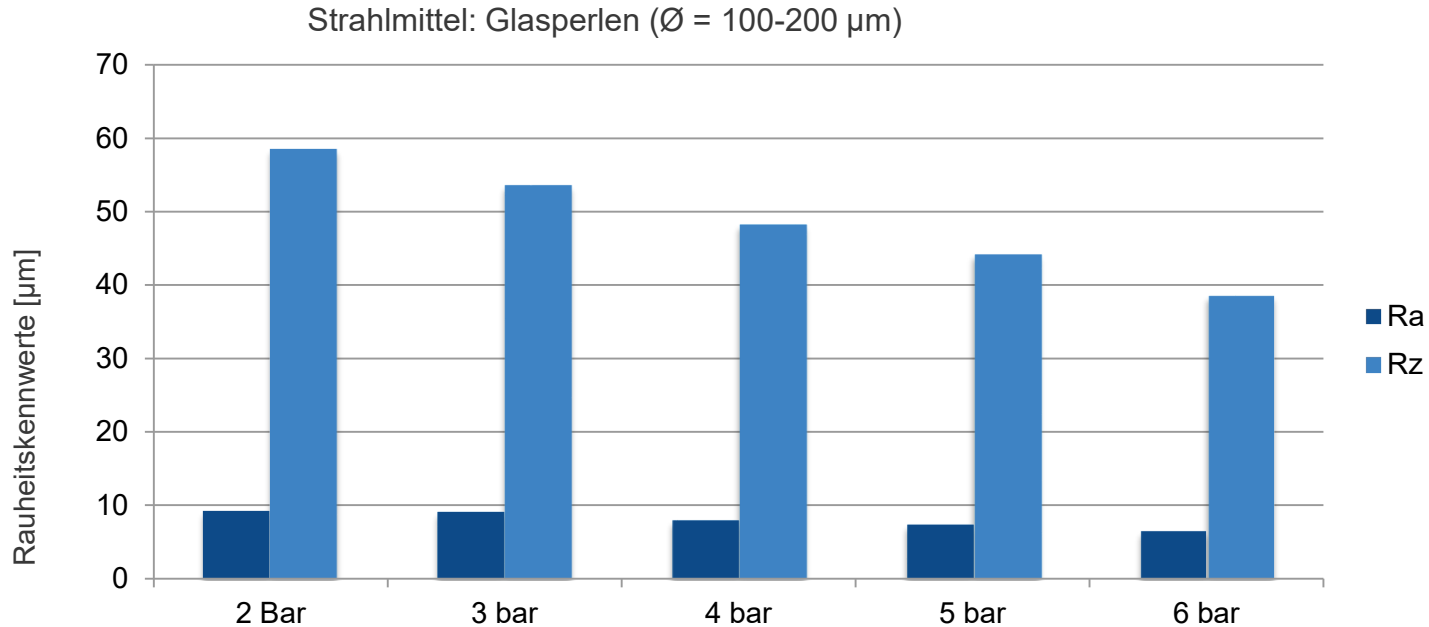
Abhängigkeit der Oberflächengüte von der Bearbeitungszeit (SLS)



7 Postprocessing

# MECHANISCHE NACHBEARBEITUNGSVERFAHREN - STRAHLEN

Abhängigkeit der Oberflächengüte von dem Bearbeitungsdruck (LS)








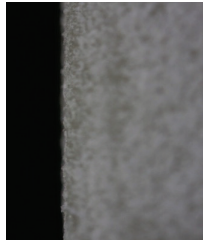
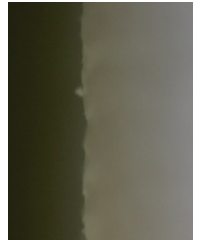
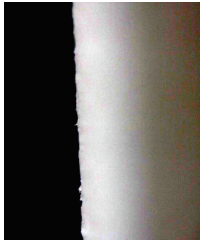


7 Postprocessing

# MECHANISCHE NACHBEARBEITUNGSVERFAHREN - STRAHLEN

Abhängigkeit der Oberflächengüte von dem Bearbeitungsdruck (LS)

Strahlmittel: Glasperlen (Ø = 100-200 µm)

Druck	2 bar	3 bar	4 bar	5 bar	6 bar
Oberfläche					
Pulver-anhaftung					

## 7 Postprocessing

# MECHANISCHE NACHBEARBEITUNGSVERFAHREN - STRAHLEN

## Vorteile

- + Nahezu Geometrieunabhängig
- + Günstig
- + Kein nennenswerter Materialabtrag
- + Reinigung der Bauteiloberfläche

## Nachteile

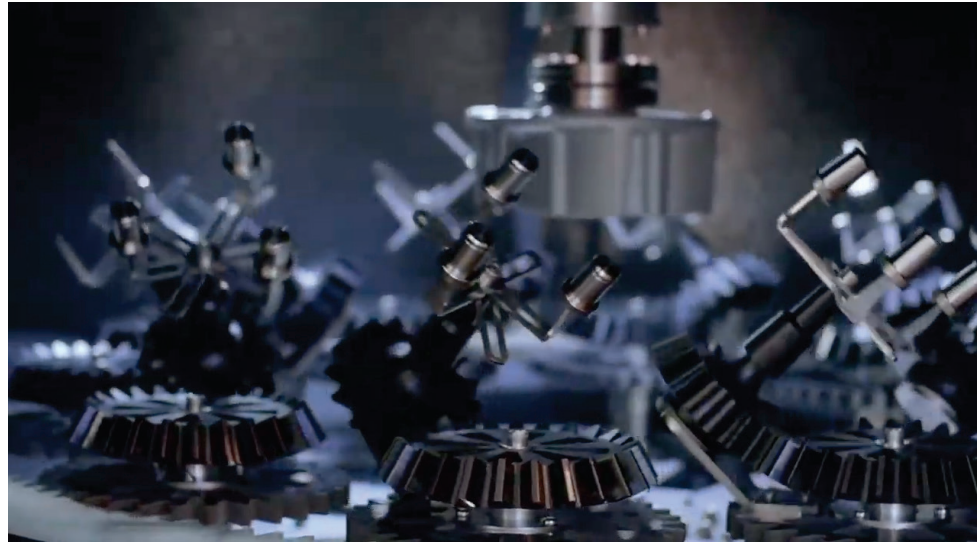
- Reproduzierbarkeit
- Schlecht automatisierbar
- Nur mittlere Oberflächenqualität realisierbar

## 7 Postprocessing

# MECHANISCHE NACHBEARBEITUNGSVERFAHREN - AUTOMATISIERTES PARTIKELSTRAHLEN

### „Twister“

- Zentrales Schleudern von Strahlmittel (Korund, Gaspelren, Metallkugeln, ...) auf umlaufende (Planetenkinematik) Bauteile
- Gleichzeitige Bearbeitung von mehreren Bauteilen
- Rauigkeit, Materialabtrag und Entgratleistung lassen sich durch eingesetzte Werkstoffe und Geschwindigkeiten nahezu beliebig variieren
- Teilautomatisierter Prozess
- Hohe Reproduzierbarkeit



## 7 Postprocessing

# MECHANISCHE NACHBEARBEITUNGSVERFAHREN - GLEITSPANEN

### Definition nach DIN 8589-17

„Spanen, bei dem zwischen Werkstücken und einer Vielzahl von losen Schleifkörpern bzw. einem Schleifmittel unregelmäßige Relativbewegungen stattfinden, die die Spanabnahme bewirken“

### Dem Gleitspanen sind untergeordnet

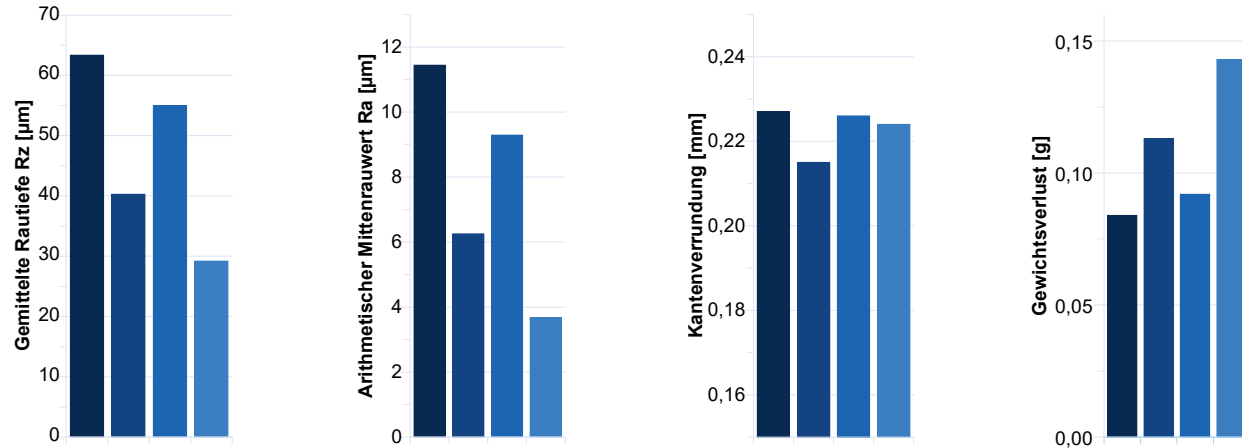
Gleichschleifverfahren  
Trommel-,  
Vibrations-,  
Fliehkraft- und  
Tauchgleitschleifen,

Gleitläppen,  
Trommel-,  
Vibrations-,  
Fliehkraft-,  
Tauchgleitläppen

## 7 Postprocessing

# MECHANISCHE NACHBEARBEITUNGSVERFAHREN - GLEITSPANEN

Gegenüberstellung verschiedener Gleitschleifverfahren anhand definierter Zielgrößen



■ Trommelgleitschleifen 
 ■ Vibrationsgleitschleifen 
 ■ Trogvibration 
 ■ Fliehkraftgleitschleifen

## 7 Postprocessing

# MECHANISCHE NACHBEARBEITUNGSVERFAHREN - GLEITSPANEN

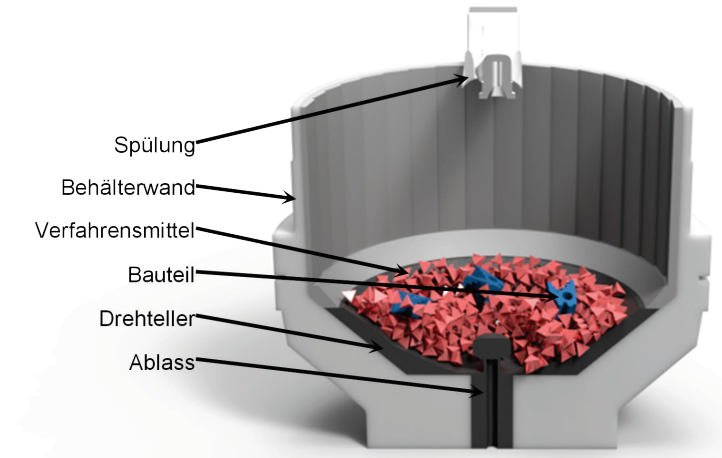
### Fliehkraftgleitschleifen

- Relativbewegung zwischen Werkstück und Schleifmittel durch Rotation des Arbeitsbehälters
- Gleichzeitige Bearbeitung von mehreren Bauteilen
- Rauigkeit, Materialabtrag und Entgratleistung lassen sich durch eingesetzte Maschinen und Werkzeuge nahezu beliebig variieren
- Teilautomatisierter Prozess

### Gleitschleifanlage der Firma OTEC

#### Technische Daten

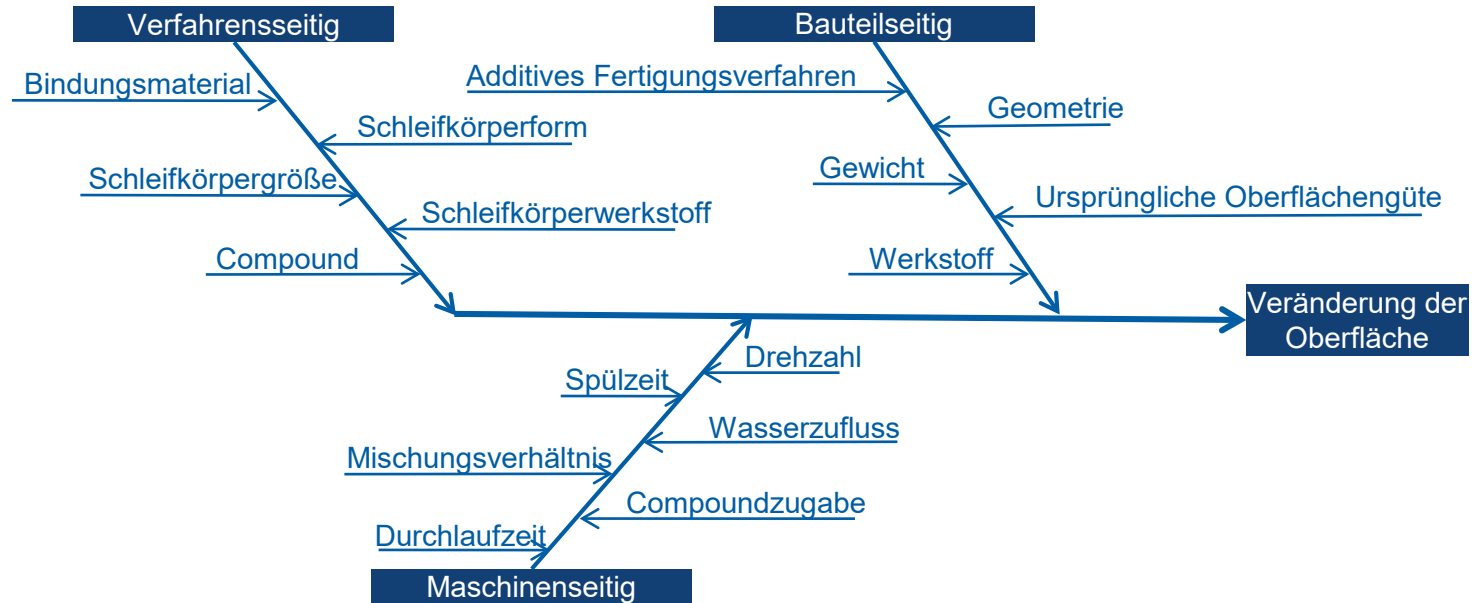
- Tellerfliehkraftanlage
- Behältervolumen 18 l
- Behälterinnendurchmesser 333 mm
- Länge x Tiefe x Höhe: 880 x 1000 x 1620 mm
- Gewicht: 127 kg
- Leistungsaufnahme: 0,9/230 [kVA/V]



7 Postprocessing

# MECHANISCHE NACHBEARBEITUNGSVERFAHREN - GLEITSPANEN

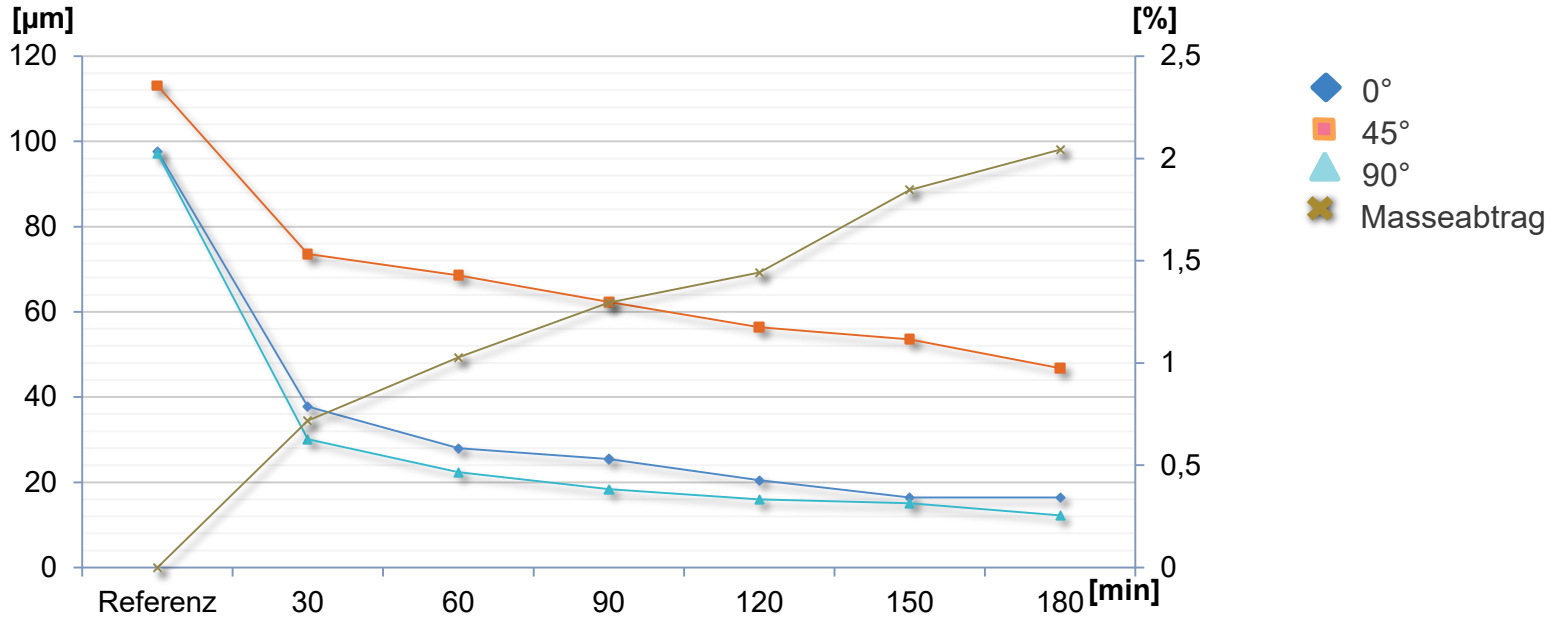
Darstellung der Einflussgrößen anhand eines reduzierten Ishikawa-Diagramms



7 Postprocessing

# MECHANISCHE NACHBEARBEITUNGSVERFAHREN - GLEITSPANEN

Abhängigkeit der Oberflächengüte und Gewichtsverlust von der Bearbeitungszeit (SLS)

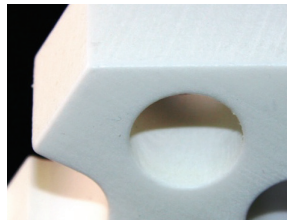
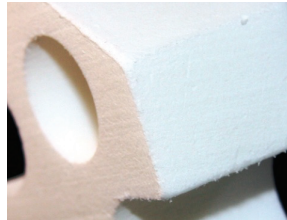
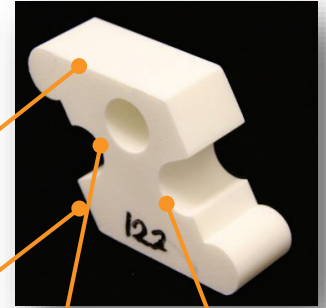


Quellen: Universität Duisburg / Essen

## 7 Postprocessing

# MECHANISCHE NACHBEARBEITUNGSVERFAHREN - GLEITSPANEN

- Hinterschneidungen (Fläche 3 & 4) generell weniger stark bearbeitet
- Konstant gute Oberflächenbearbeitung mit der Kegelgeometrie
- Keramiksleifkörper können zu Beschädigungen am Bauteil führen
- Kegelgeometrie liefert insgesamt die besten Ergebnisse



Bindung	Geometrie	Fläche 1	Fläche 2	Fläche 3	Fläche 4
Keramik	Dreieck	++	+	--	o
	Zylinder	+	+	o	o
	Kugel	+	+	-	-
Kunststoff	Pyramide	o	+	--	-
	Kegel	++	++	-	o

**Legende**

++ sehr gut geeignet	o geeignet	- bedingt geeignet
+ gut geeignet		-- schlecht geeignet

Quellen: Universität Duisburg / Essen

## 7 Postprocessing

# MECHANISCHE NACHBEARBEITUNGSVERFAHREN - GLEITSPANEN

## Vorteile

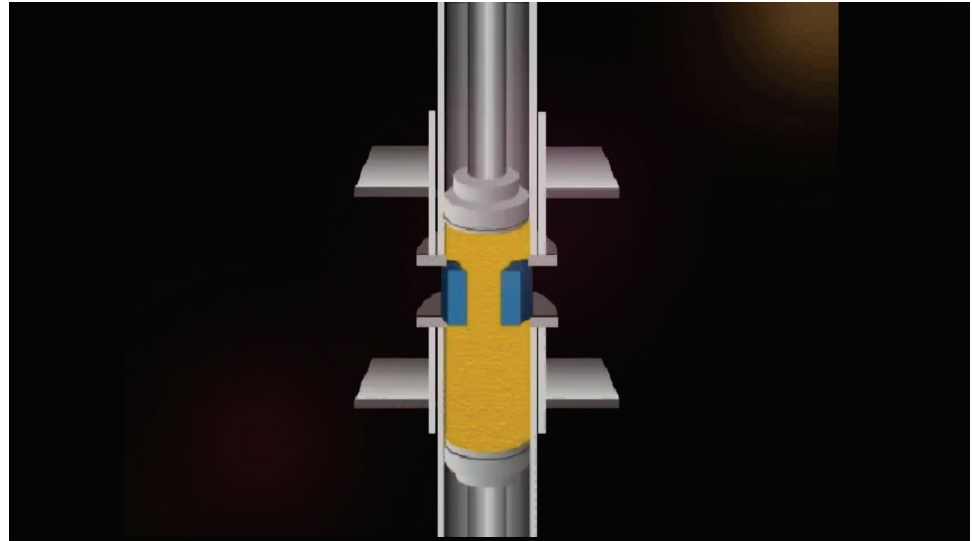
- + Schnell
- + Hohe Oberflächenqualität
- + Teilautomatisierter Prozess
- + Für Kleinserienfertigung geeignet
- + Kantenverrundung möglich
- + Komplizierte Geometrien möglich

## Nachteile

- Geometrieabhängigkeit
- Hinterschneidungen schlecht / gar nicht erreichbar
- Kantenverrundung kann unerwünscht sein
- Reproduzierbarkeit
- Hohe Anlagenkosten

# ABRASIVE FLOW MACHINING

- Schleifen mit zähflüssigem Trägermedium
- zyklisches Pumpen (vorwärts-rückwärts) oder kontinuierliches Pumpen in eine Richtung (vorwärts)
- Abtrag der Oberfläche durch Relativbewegung zum Schleifpartikel
- Richtungs- bzw. flußabhängige Abtragleistung (ungewünschte Geometrieänderung / Auswaschen möglich)



## 7 Postprocessing

# VAKUUM-SAUGSPANEN

- Trägermedium mit Schleifpartikeln
- Bewegen des Mediums durch Unterdruck = Saugen
- Abrasivwirkung der Schleifpartikel entlang der Flussrichtung
- Vorteil: kein Stau der Schleif- und abgetragenen Partikel
- Nachteil: Sacklöcher u.ä. Geometrien nicht bearbeitbar

## 7 Postprocessing

# ENTFERNUNG DER RANDZONE DURCH ELEKTROCHEMISCHE PROZESSE

### (Elektro-)chemische Polierverfahren

- Kurze Bearbeitungszeit (Minuten)
- Hohe Reproduzierbarkeit (kein mechanischer Einfluss)
- Flächiger Abtrag auch an schwer zugänglichen Stellen
- Hohe Oberflächengüte



- Verbesserte Oberfläche
- Randzone entfernt
- Erhöhte dynamische Festigkeit
- Oberfläche beschichtbar

### Vergleich: Manuelle Nachbearbeitung

- Lange Polierzeiten
- Schwierige Zugänglichkeit bei komplexen Strukturen
- Eingeschränkte Reproduzierbarkeit in Hinblick auf:
  - Abtrag der Randzone
  - Maßhaltigkeit
  - Formgenauigkeit
  - Oberflächengüte

## 7 Postprocessing

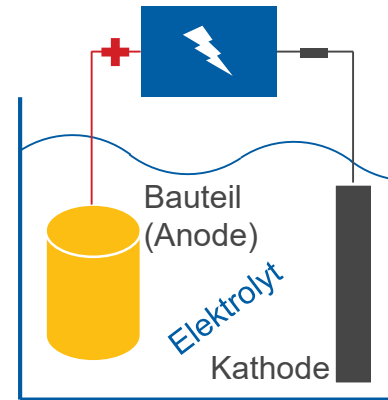
# ELEKTROCHEMISCHES POLIEREN – PRINZIP

Umkehrung des galvanischen Prozesses

- Metallabtragung in einem Elektrolyt (Lösung mit hoher Leitfähigkeit) von einer Werkstückoberfläche unter Gleichstromeinwirkung
- Bauteil bildet den Pluspol (Anode), Minuspol (Kathode) wird hinzugegeben.
- Unter Stromzuschaltung löst sich das Metall an der Anodenoberfläche auf und geht in Lösung.

Einfluss auf Materialabtrag durch:

- geeignete Wahl des Elektrolyten und der Kathode
  - Z.B. Mischungen von Phosphorsäure, Schwefelsäure
- Stromdichte  $j$ 
  - Zwischen  $0,1$  und  $10 \text{ A/dm}^2$
- Polierdauer
  - i.d.R. im Bereich von Minuten



## 7 Postprocessing

# „HIRTISIEREN“

Kombination verschiedener chemischer und elektrochemischer Bäder und Abträge in einer Anlage

- Hohe Abtragleistung durch materialspezifische chemische Lösungen (Säuren/Laugen)
- Entfernung auch von Support möglich
- Gleicher Abtrag an allen Stellen: großes Aufmaß auf Bauteile nötig
- Hohe Mengen gelösten Materials (Abfall und Kosten)

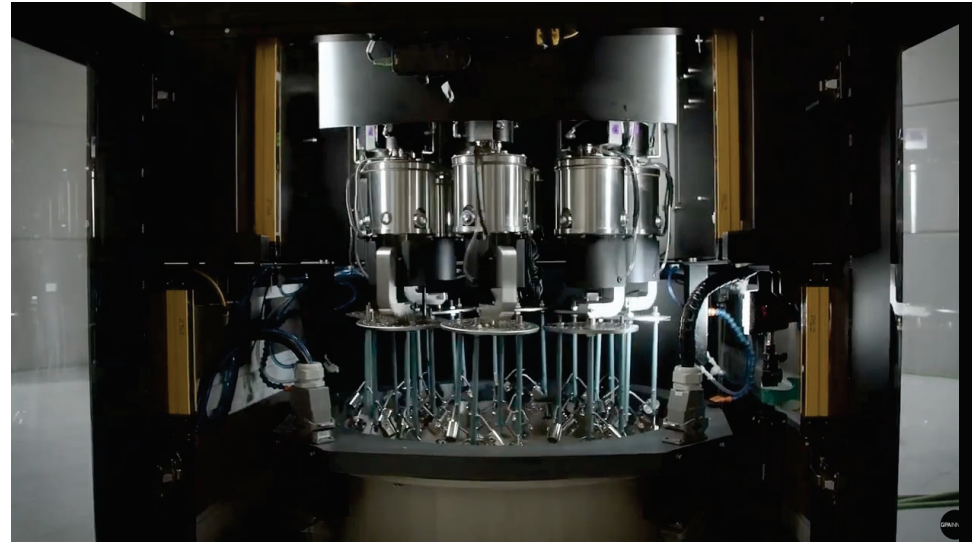


## 7 Postprocessing

# DLYTE

Elektrochemische Bearbeitung mit bewegten Teilen im Festkörperelektrolyt

- Niedrige Abtragleistung durch materialspezifische Elektrolytkugeln
- Zugänglichkeit zu internen Kavitäten eingeschränkt
- Hohe Mengen spezifischer Elektrolyt nötig (hohe Kosten)



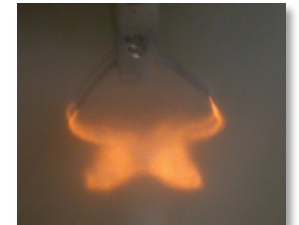
# PLASMA-ELEKTROLYTISCHES POLIEREN

Anodischer Materialabtrag und anodisches Plasma bei hohen Spannungen:  
**Kombination von strombasiertem chemischem und physischem Abtrag**

- Elektrolytische Zelle
- Werkstück ist in Elektrolyt getaucht und anodisch kontaktiert
- Niedrig konzentrierter wässriger Elektrolyt, materialspezifisch,  
 $4 \leq \sigma \leq 30 \text{ S/m}$
- Gleichspannung (DC) zwischen  $180\text{V} \leq u_{\text{PeP}} \leq 400\text{V}$  führt zur Ausbildung einer Plasmahülle um das Bauteil
- Elektrochemische und Plasmareaktionen finden statt
- Die Plasmazone führt in Verbindung mit elektrochemischen Prozessen zu ausnehmend guter Oberflächenqualität



Unbehandeltes Teil (Ti)



Bauteil während PeP



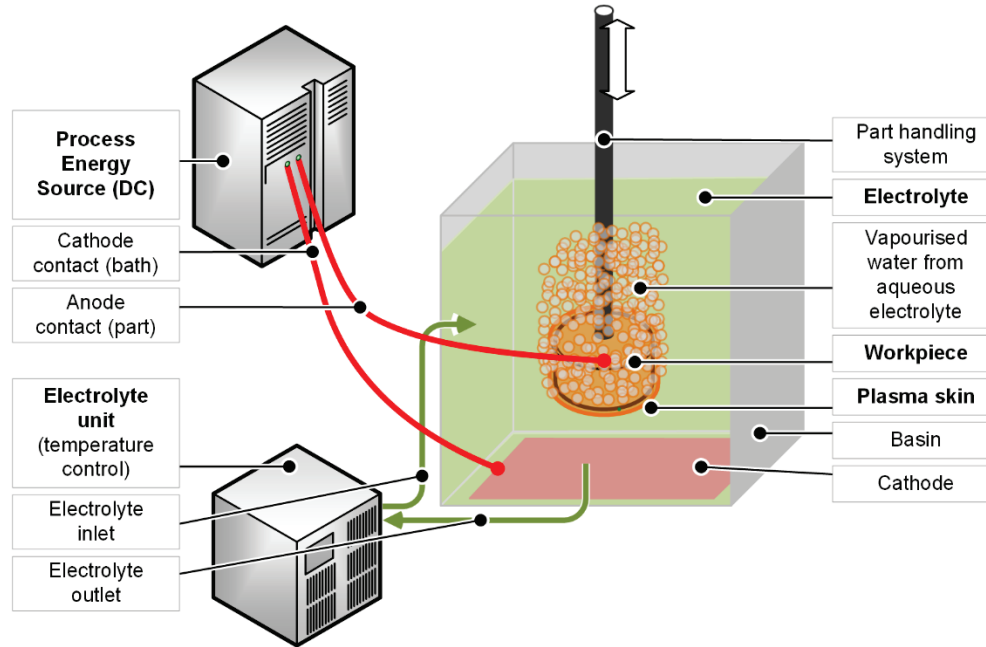
Poliertes Bauteil

## 7 Postprocessing

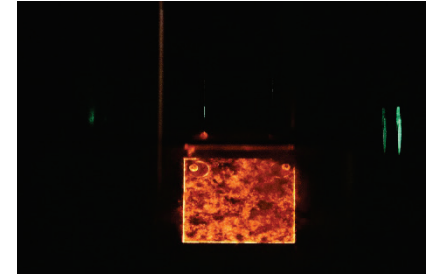
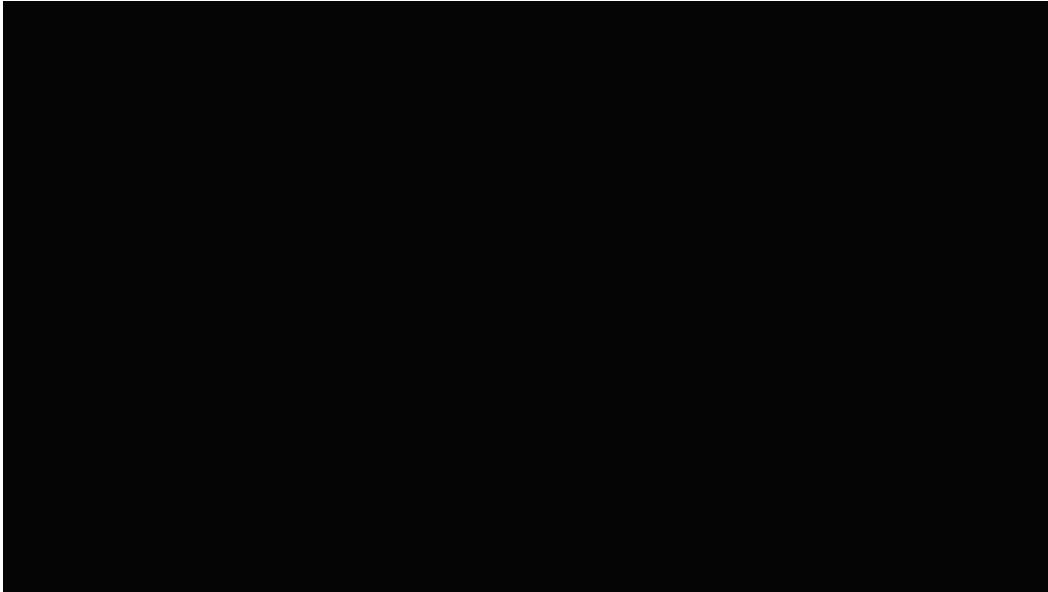
# VERGLEICH MIT ANDEREN ABTRAGENDEN VERFAHREN

Charakteristik	EDM	ECM	PeP
Spannung [V]	75-400	<60	180-400+
Elektrodenabstand [mm]	0.005-0.5	0.015-1	5-500
Werkstückpolarität	Anode oder Kathode	Anode	Anode
Leitender Elektrolyt	Nein (dielektrisch)	Ja	Ja
Erzeugung glänzender Oberflächen	Nein	Abhängig von Parametern	(Ja)
Werkstückspezifisches Werkzeug nötig	(Ja)	(Ja)	Nein

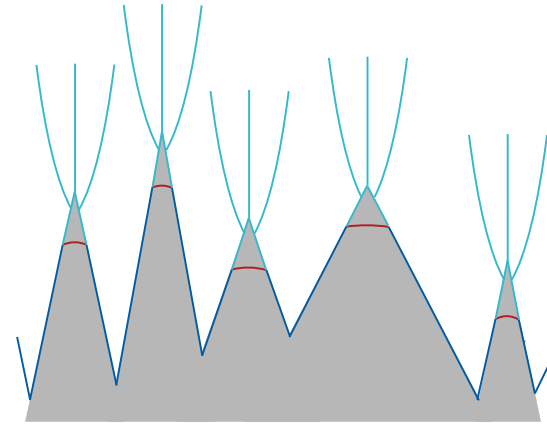
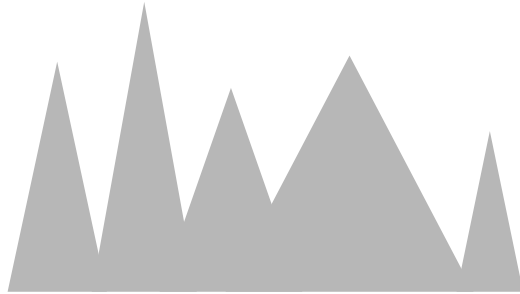
# PeP AUFBAU



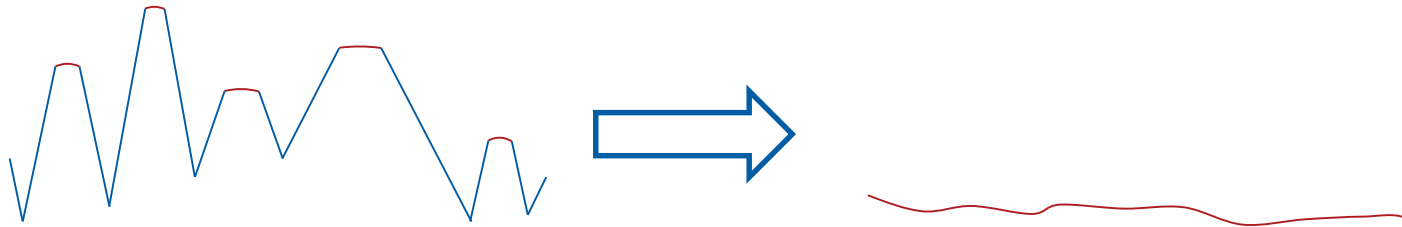
# PeP PROZESS



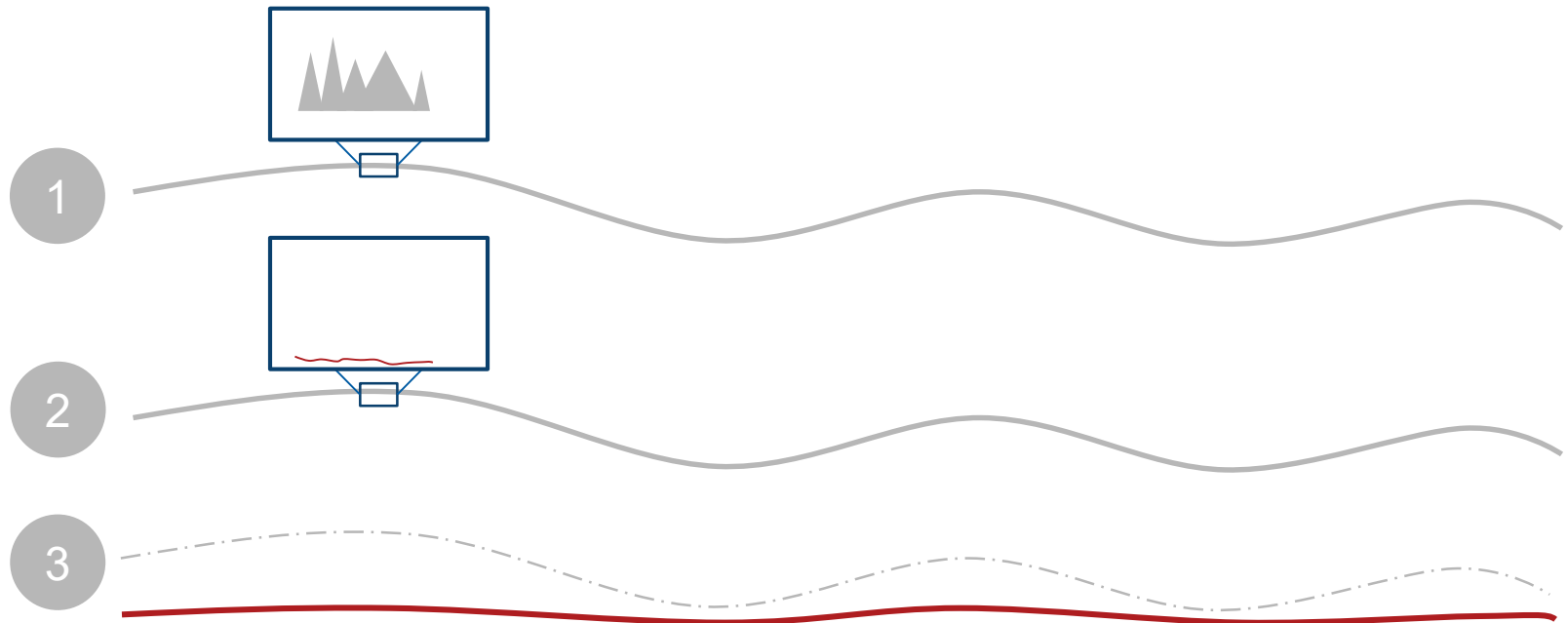
# ENTWICKLUNG DER OBERFLÄCHE IM PeP



# ENWICKLUNG DER OBERFLÄCHE IM PeP



# ENWICKLUNG DER OBERFLÄCHE IM PeP



# PeP-ANWENDUNG

## AM (SLM) Bauteil

- Material: Stahl
- Ziel: glatte Oberfläche, Glanz erhöhen
- Vorbehandlung: Korundstrahlen
- > Glanzerhöhung und Verringerung der Rauheit
- > Reduzierung der Sichtbarkeit von Baustufen

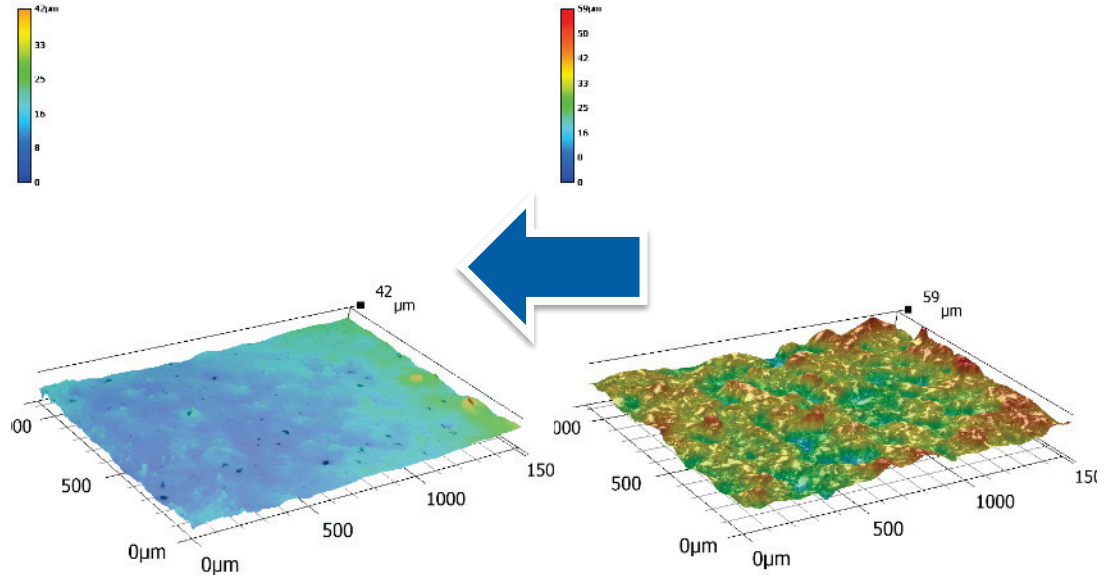


© H&E Wzb

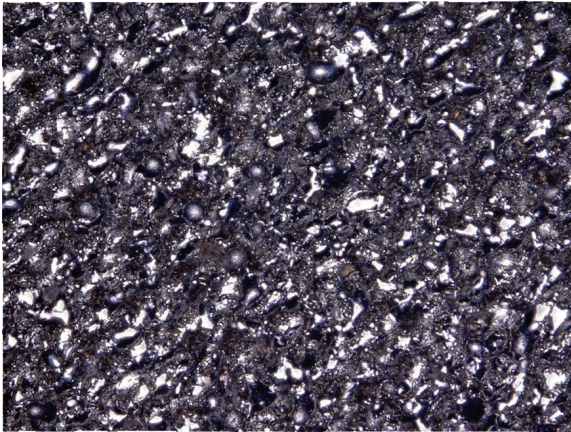
# AM OBERFLÄCHENVERÄNDERUNG MIT PeP

## AM (SLM) Teil

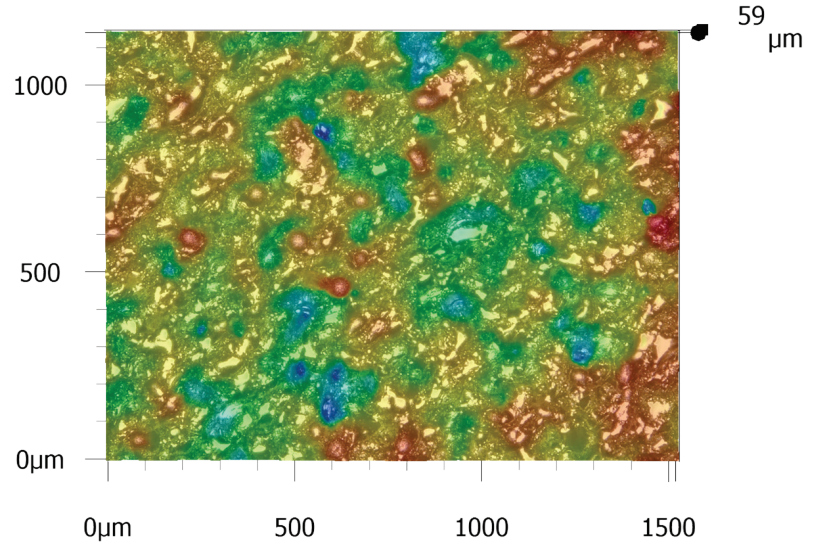
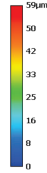
- Material: 316l Stahl
- Polierdauer: 40min.
- Vorbehandlung: keine
- > Glanzerhöhung und Rauheitsverringering
- > Reduktion der AM-typischen Oberflächentopologie



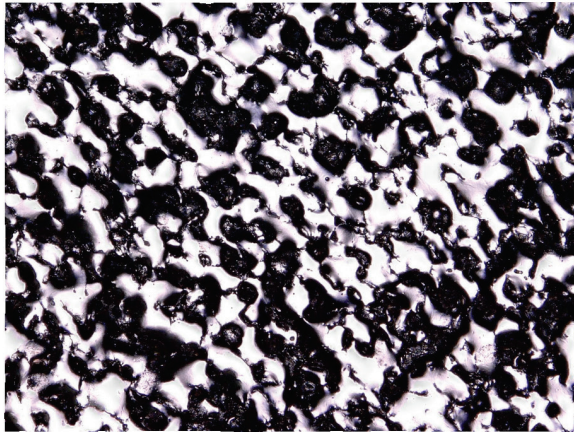
# AM PeP



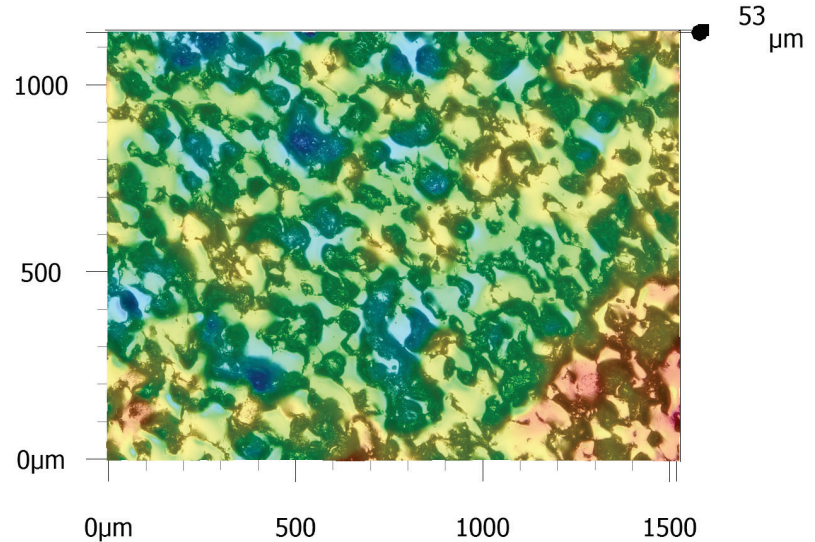
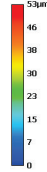
Steel SLM part, 2min. PeP



# AM PeP

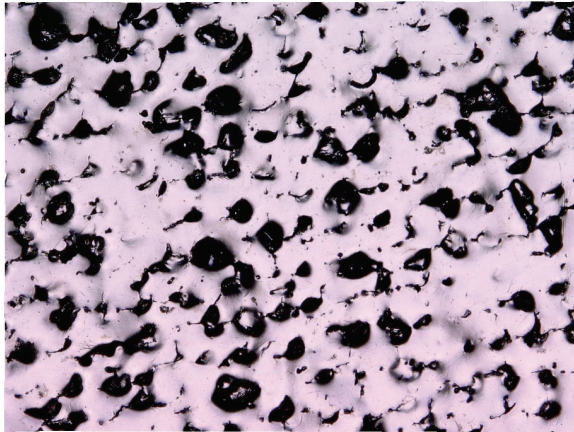


Steel SLM part, 8 min. PeP

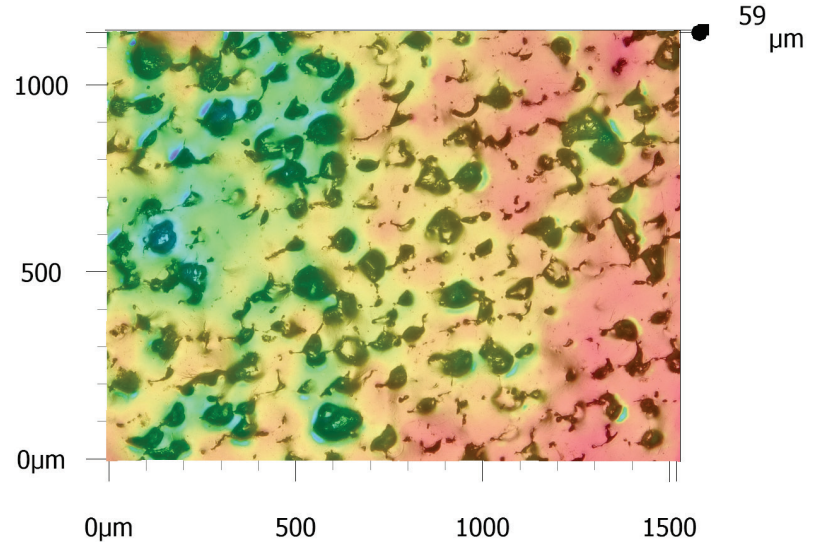
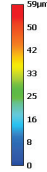


## 7 Postprocessing

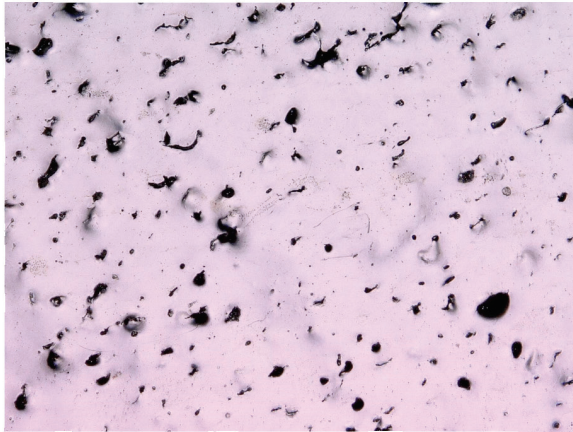
# AM PeP



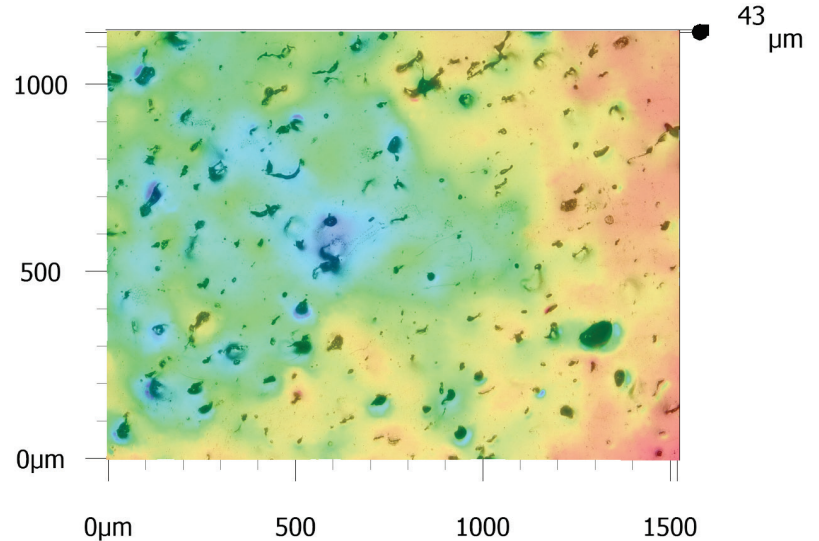
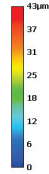
Steel SLM part, 16 min. PeP



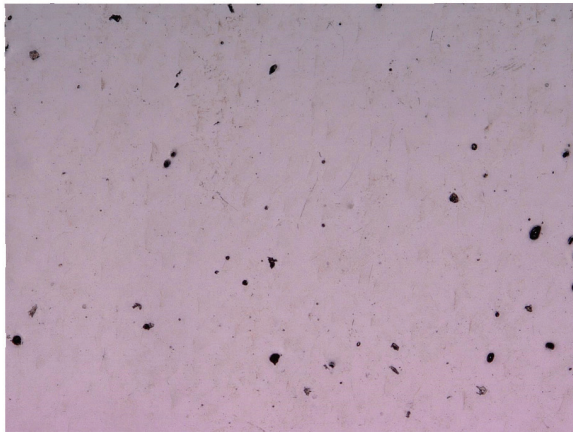
# AM PeP



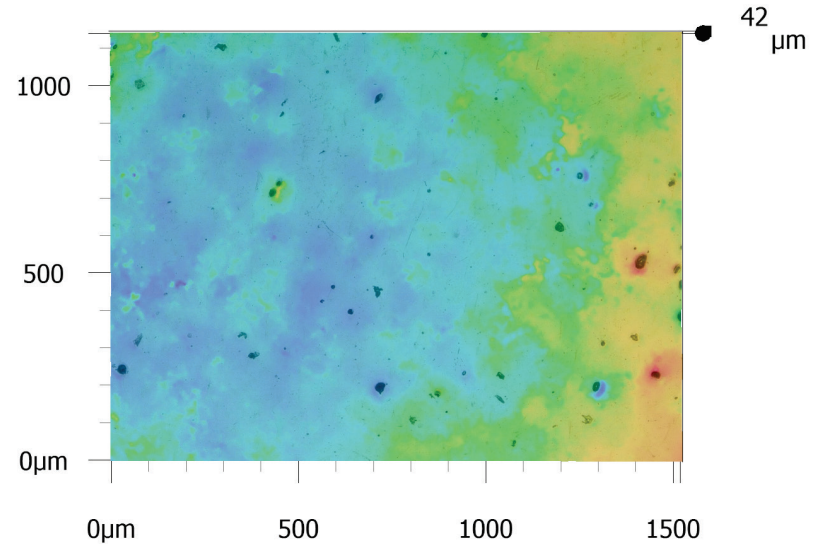
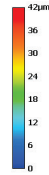
Steel SLM part, 30 min. PeP



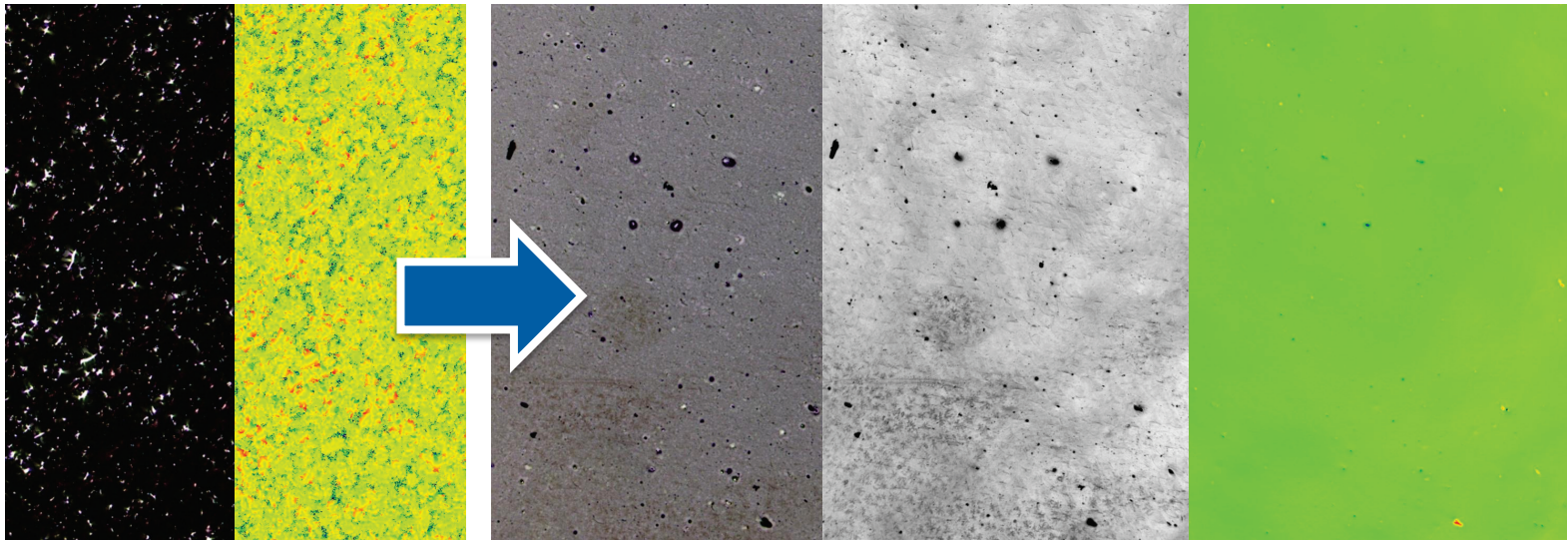
# AM PeP



Steel SLM part, 40 min. PeP

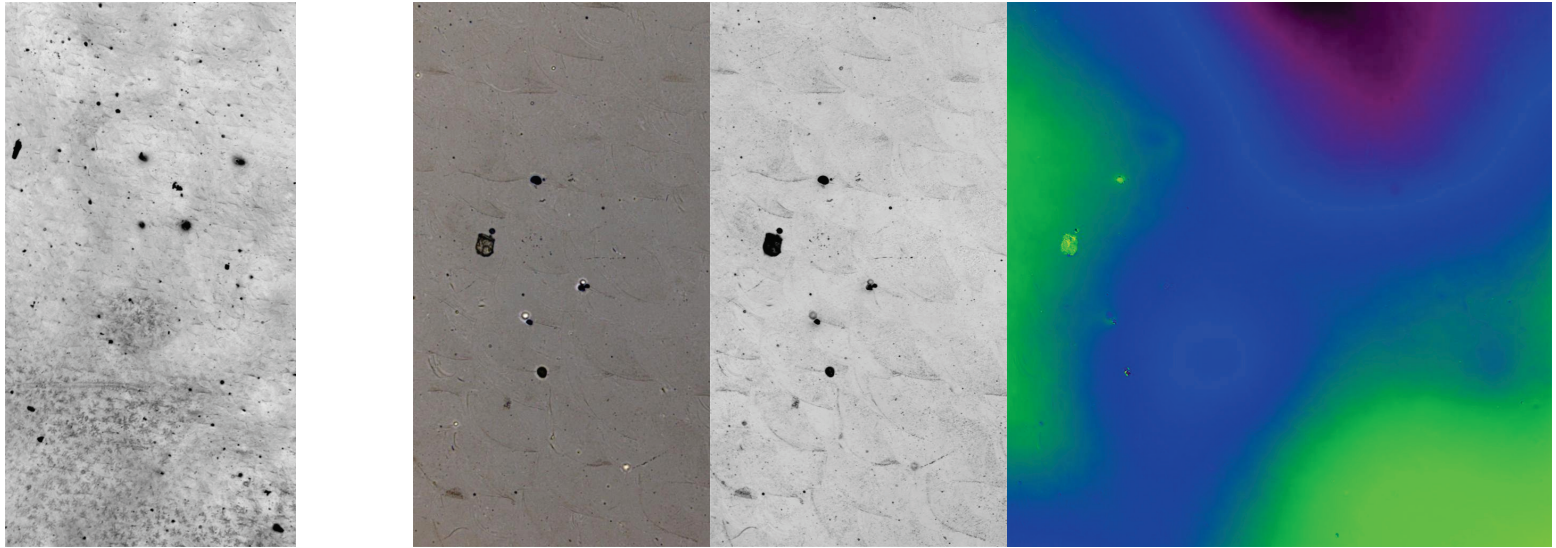


# AM PeP



Stahl SLM Teil, 2min/30min PeP, LEXT imaging

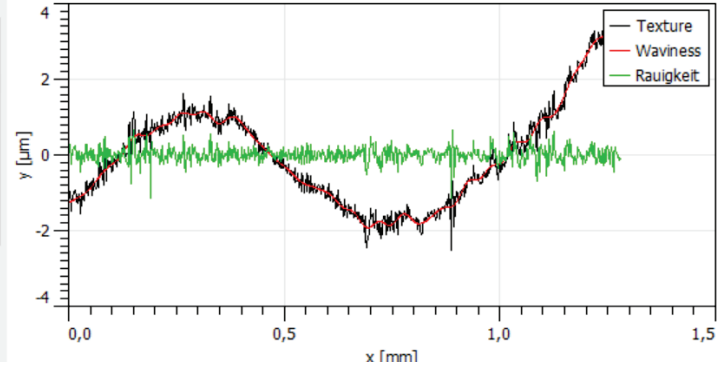
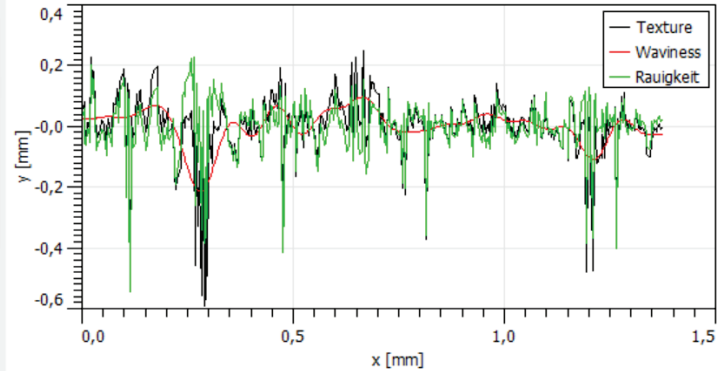
# AM PeP



Stahl SLM Teil, 30min PeP, LEXT imaging (rechts: höhere Vergrößerung)

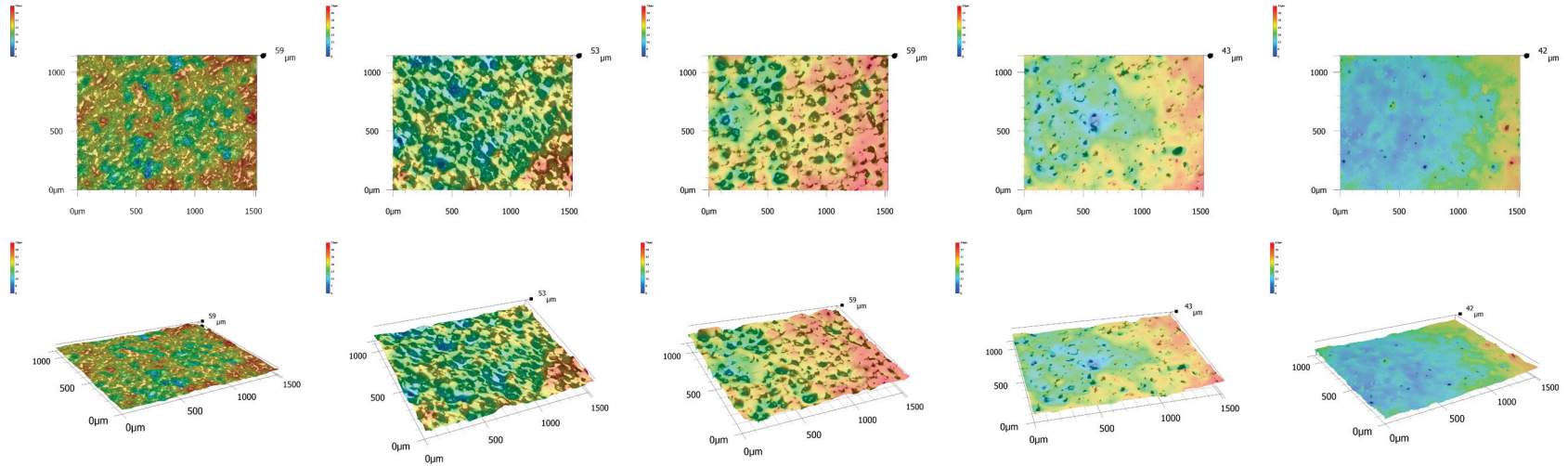
# 7 Postprocessing

Amplitude		
$R_a$	Roughness average	58,81 $\mu\text{m}$
$R_q$	Root mean square roughness	87,37 $\mu\text{m}$
$R_t$	Maximum height of the roughness	773,4 $\mu\text{m}$
$R_v$	Maximum roughness valley depth	547,9 $\mu\text{m}$
$R_p$	Maximum roughness peak height	225,4 $\mu\text{m}$
$R_{tm}$	Average maximum height of the roughness	520,8 $\mu\text{m}$
$R_{vm}$	Average maximum roughness valley depth	368,6 $\mu\text{m}$
$R_{pm}$	Average maximum roughness peak height	152,2 $\mu\text{m}$
$R_{3z}$	Average third highest peak to third lowest valley height	563,5 $\mu\text{m}$
$R_{3z\ ISO}$	Average third highest peak to third lowest valley height	365,4 $\mu\text{m}$
Amplitude		
$R_a$	Roughness average	131,0 nm
$R_q$	Root mean square roughness	181,5 nm
$R_t$	Maximum height of the roughness	1,845 $\mu\text{m}$
$R_v$	Maximum roughness valley depth	1,179 $\mu\text{m}$
$R_p$	Maximum roughness peak height	665,8 nm
$R_{tm}$	Average maximum height of the roughness	1,413 $\mu\text{m}$
$R_{vm}$	Average maximum roughness valley depth	822,0 nm
$R_{pm}$	Average maximum roughness peak height	590,8 nm
$R_{3z}$	Average third highest peak to third lowest valley height	1,379 $\mu\text{m}$
$R_{3z\ ISO}$	Average third highest peak to third lowest valley height	802,2 nm



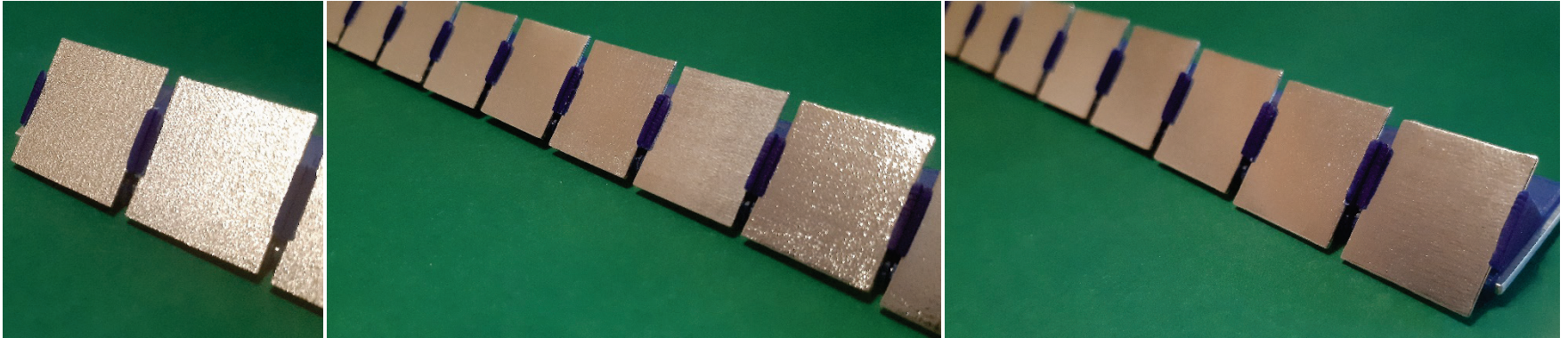
Steel SLM part,  
2min/30min PeP,  
LEXT imaging,  
gwyddion analysis  
Careful: not acquired  
according to standards!

# PeP VON AM-BAUTEILEN: RAUHEITSREDUKTION



Stahl SLM Bauteil, 2-40 min. PeP

# PEP: ENTWICKLUNG DER OBERFLÄCHE VISUELL

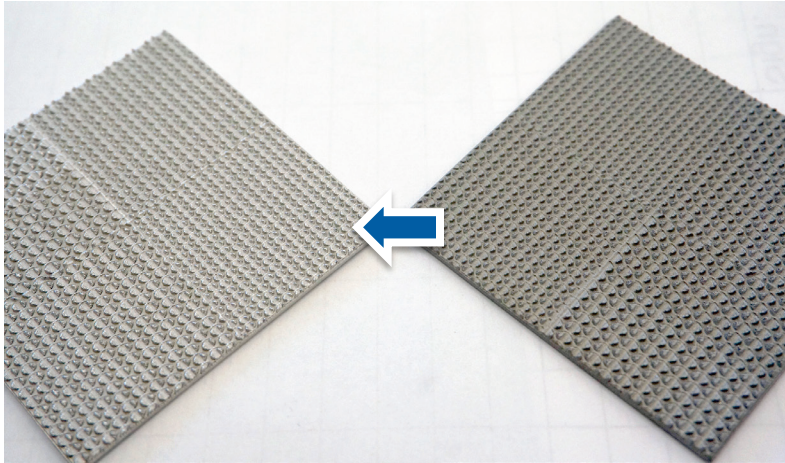


Stahl SLM Teil, 0/2min 8/10/12/14min 18/20/25/30min PeP

# PEP: DESIGN/GLANZ

## AM (SLM) Teil

- Material: Stahl 316l
- Spezifisches AM-freundliches Oberflächendesign



# PEP: MÖGLICHE WERKSTOFFE

- Edelstähle
- Werkzeugstähle/Warmarbeitsstähle (Legierung relevant)
- Nickelbasislegierungen (Inconel)
- Kupfer und Kupferlegierungen
- Palladium, Platin, Rhodium, Iridium Legierungen
- Titan (Elektrolytbegrenzung)
- Aluminium Legierungen (Siliziumgehalt für Glanz relevant)

# PeP VORTEILE

- Keine oder geringe Anforderung an Vorbehandlung
- Keine geformte Elektrode/Werkzeug notwendig
- Komplexe Geometrien polierbar
- Niedrige Rauheit erzielbar  
( $R_a \approx 0.01\mu\text{m}$ , abhängig von Ausgangsrauheit)
- Kurze Polierdauer  
( $\text{MRR} \geq 50 \mu\text{m}/\text{min}$  erreichbar)
- Verbessertes Oberflächenglanz  
( $\text{MRR} \leq 5 \mu\text{m}/\text{min}$ )
- Umweltfreundliche, niedrigkonzentrierte Elektrolyte
- Keine Adsorbate in der polierten Oberfläche



© BTE / TUC

## PeP GRENZEN

- Elektrisch leitfähige Bauteile erforderlich
- Geeignet für Endpolitur und Gratentfernung, aber nicht für ein-Schritt-Polieren sehr rauher Oberflächen und breiter Grate (Eckenverrundung nach langer Prozessdauer)
- Prozessenergiequelle legt maximale Polierfläche fest
- Behandlung innenliegender Kavitäten schwierig
- Elektrolytanpassung für jede Legierung nötig

## 7 Postprocessing

# BESCHICHTUNGSVERFAHREN - BESCHICHTEN AUS DEM FLÜSSIGEM ZUSTAND

Prozessschritte



[ultraschall-reinigen.ch]



[coating-tech.de]



[coating-tech.de]

## 7 Postprocessing

# BESCHICHTUNGSVERFAHREN - BESCHICHTEN AUS DEM FLÜSSIGEM ZUSTAND

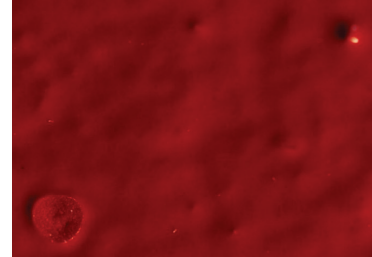
Handgeschliffen



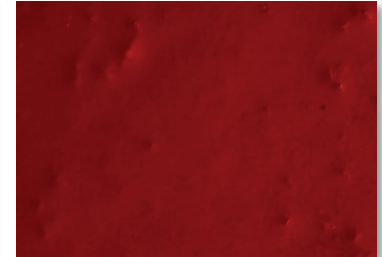
Grundiert



Lackiert



Klarlackiert



## 7 Postprocessing

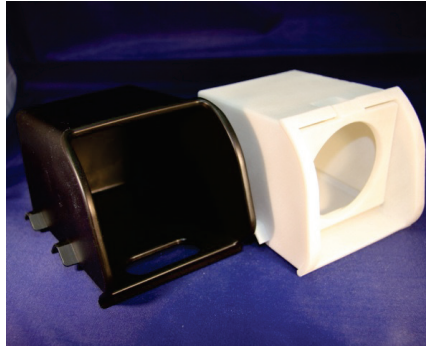
# BESCHICHTUNGSVERFAHREN - BESCHICHTEN AUS DEM FLÜSSIGEM ZUSTAND

Haupteinflussgrößen beim Beschichten aus dem flüssigem Zustand

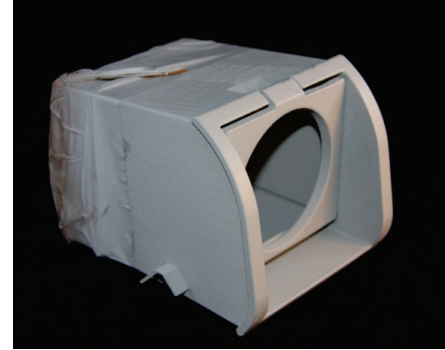
Lackiervorgang	Kabine	Lack	Substrat
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Lackmenge</li><li>▪ Lackierabstand</li><li>▪ Bewegungs- geometrie</li><li>▪ Glockendrehzahl</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Lufttemperatur</li><li>▪ Luftfeuchte</li><li>▪ Luftströmung</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Lacktemperatur</li><li>▪ Lackviskosität</li><li>▪ Lackrezeptur</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Oberflächenrauheit</li><li>▪ Chemische Verträglichkeit</li><li>▪ Oberflächen- temperatur</li><li>▪ Oberflächen- feuchtigkeit</li></ul>

## 7 Postprocessing

# BESCHICHTUNGSVERFAHREN - BESCHICHTEN AUS DEM FLÜSSIGEM ZUSTAND



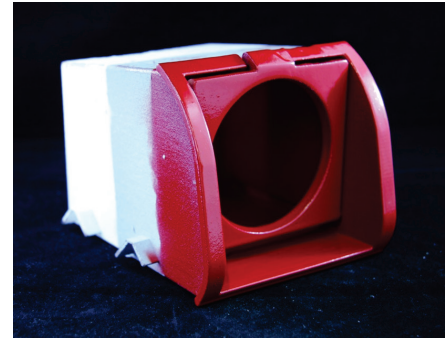
Grundieren →



← Lackieren

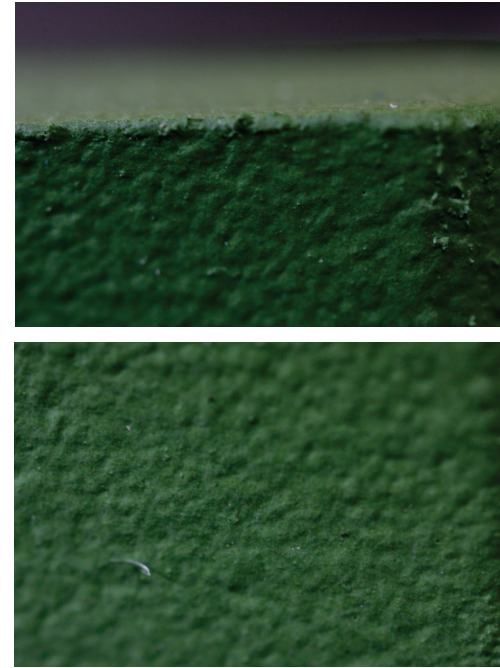
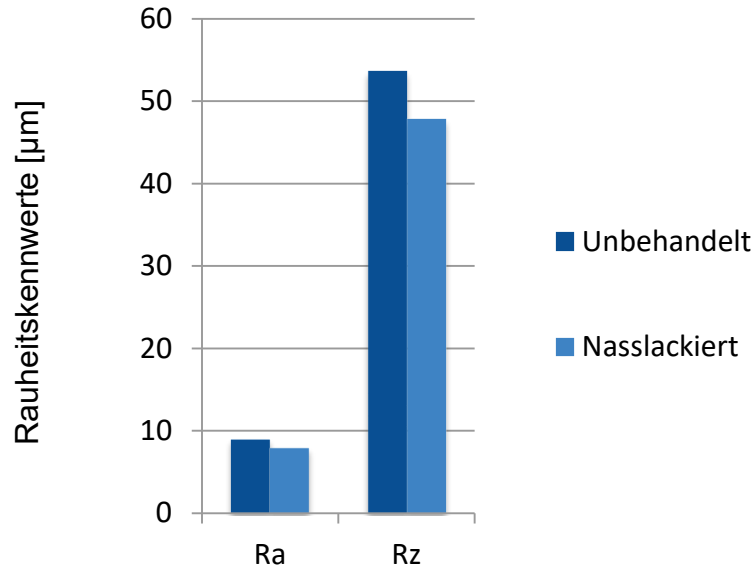


→ Klarlackieren



7 Postprocessing

# BESCHICHTUNGSVERFAHREN - BESCHICHTEN AUS DEM FLÜSSIGEM ZUSTAND



## 7 Postprocessing

# BESCHICHTUNGSVERFAHREN - BESCHICHTEN AUS DEM FLÜSSIGEM ZUSTAND

### Vorteile

- + Farbgebung
- + Einebnungseffekt
- + Wasserdichte
- + Günstig
- + Automatisierbar

### Nachteile

- Vorbereitende Schritte nötig
- Farbe zieht in den Werkstoff ein
- Funktionsintegration schwierig
- Mehrschrittiges Verfahren
- Untermaß nötig
- Beschichtung nicht sehr widerstandsfähig

7 Postprocessing

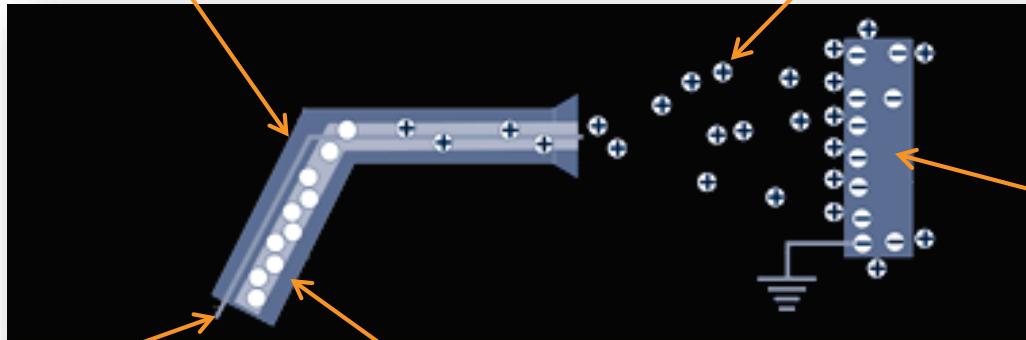
# BESCHICHTUNGSVERFAHREN - BESCHICHTEN AUS DEM FESTEN ZUSTAND

Prozessschritte:



Isolierte Sprühpistole

Aufgeladene Pulverpartikel



Werkstück

Spannungszufuhr

Pulverzufuhr

[www.mwib.de]

7 Postprocessing

# BESCHICHTUNGSVERFAHREN - BESCHICHTEN AUS DEM FESTEN ZUSTAND

Haupteinflussgrößen beim Beschichten aus dem festen Zustand

### Zerstäuber

- Pulvermenge
- Lackierabstand
- Bewegungsgeometrie
- Aufladung

### Kabine

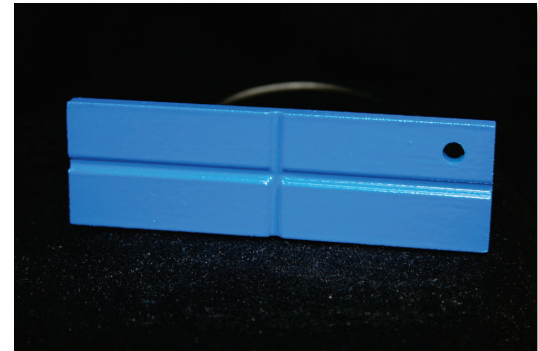
- Fördereinrichtung
- Gehängegestaltung

### Pulver

- Pulvertemperatur
- Pulversorte

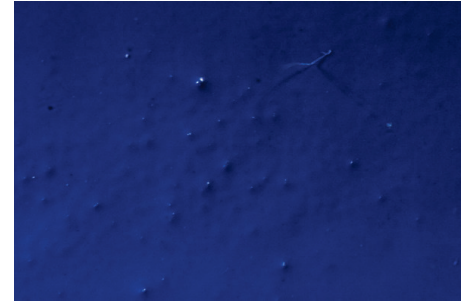
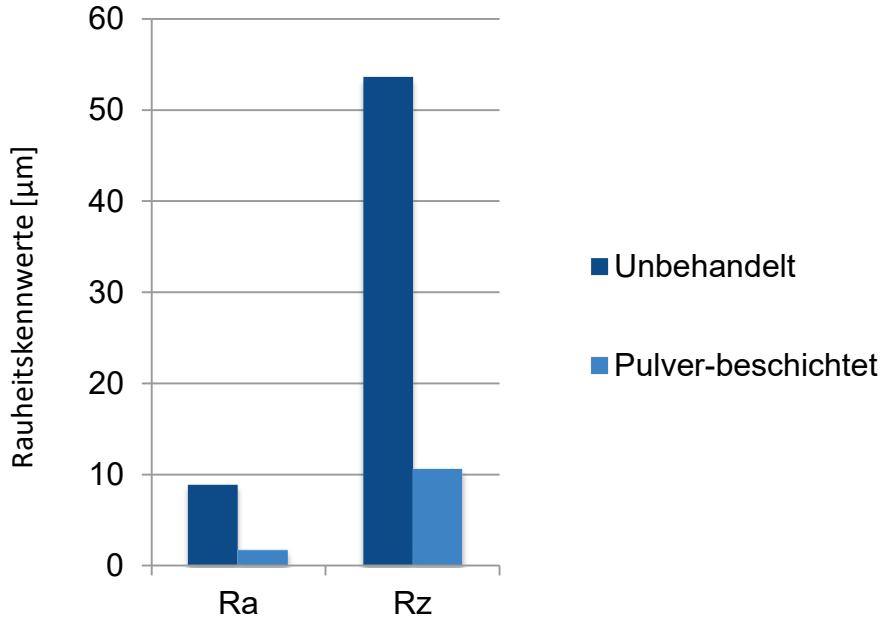
### Ofen

- Temperatur
- Temperaturverlauf



7 Postprocessing

# BESCHICHTUNGSVERFAHREN - BESCHICHTEN AUS DEM FESTEN ZUSTAND



## 7 Postprocessing

# BESCHICHTUNGSVERFAHREN - BESCHICHTEN AUS DEM FESTEN ZUSTAND

### Vorteile

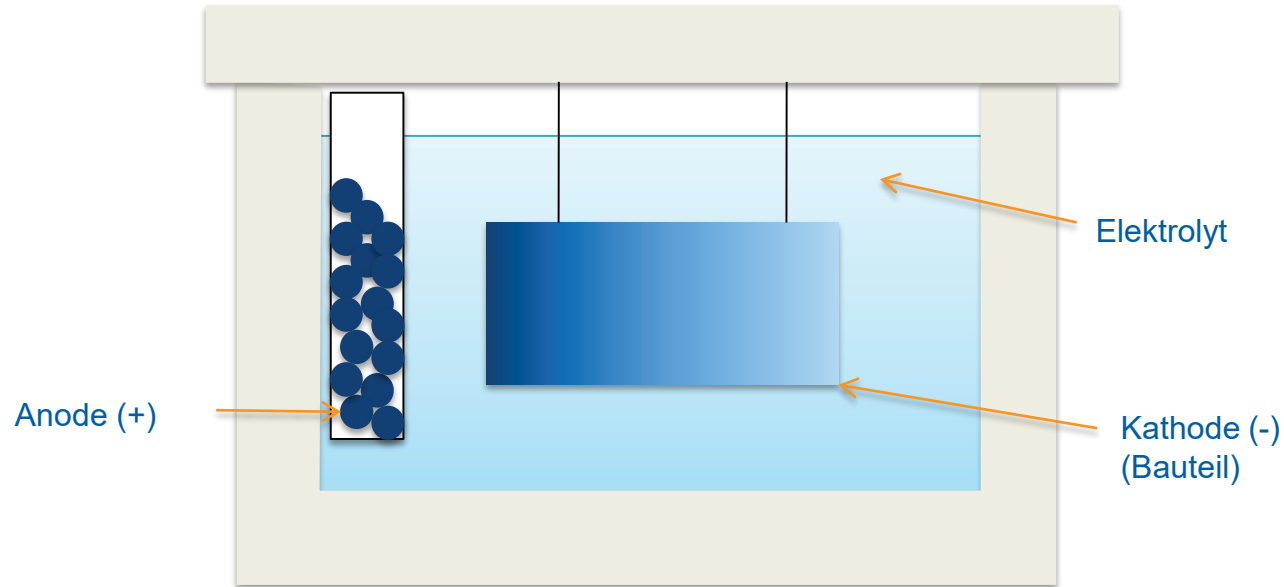
- ➕ Farbgebung
- ➕ Einebnungseffekt
- ➕ Wasserdicht
- ➕ Automatisierbar

### Nachteile

- ➖ Funktionsintegration schwierig
- ➖ Hinterschneidungen / Bohrungen schwer zu erreichen
- ➖ Oberflächenaktivierung nötig
- ➖ Untermaß nötig

# BESCHICHTUNGSVERFAHREN - GALVANISIEREN

Verfahrensbeschreibung



## 7 Postprocessing

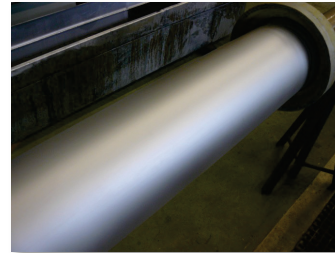
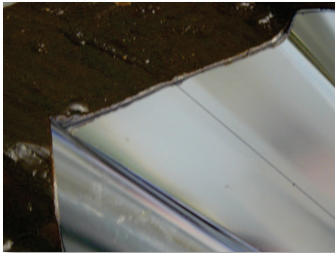
# BESCHICHTUNGSVERFAHREN - GALVANISIEREN

## Prozessschritte

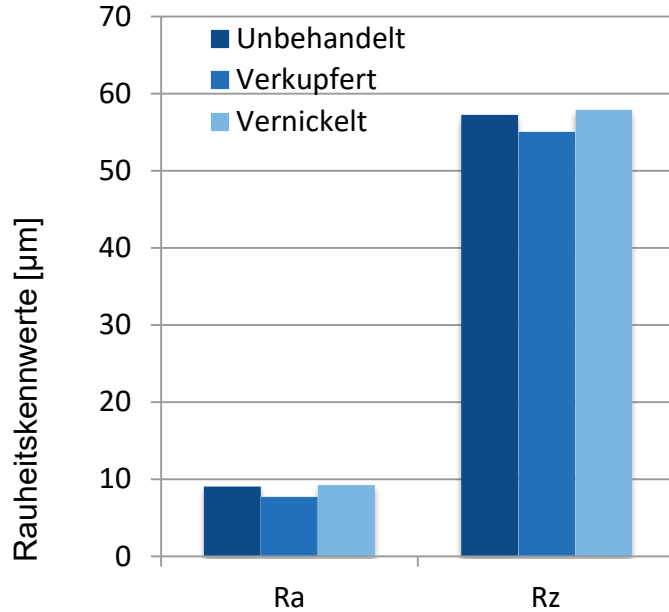
Vorbereiten

Silberlack aufbringen

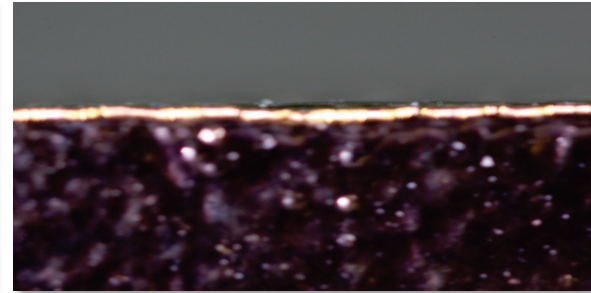
Galvanisieren



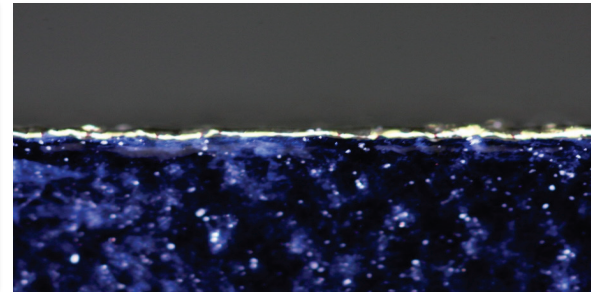
# BESCHICHTUNGSVERFAHREN - GALVANISIEREN



Verkupfert



Vernickelt



# BESCHICHTUNGSVERFAHREN - GALVANISIEREN

SLS Bauteil

„Zugprobe“

Werkstoffkombination Graphit / Polyamid ->  
Leitfähige Beschichtung nicht nötig



	Unbeschichtete Probe	Beschichtete Probe	Veränderung [%]
Maximalkraft $F_{max}$ [N]	255,42	458,33	79,44
Zugfestigkeit [MPa]	6,14	11,71	90,72
Bruchdehnung A [%]	0,29	0,88	203,45
Ersatzstreckgrenze $R_{p0,2}$ [MPa]	1,48	10,27	593,92

7 Postprocessing

# BESCHICHTUNGSVERFAHREN - GALVANISIEREN

**Mögliche Erscheinungsformen:**

Hochglanz: Kupfer / Nickel  
 Matt: Kupfer / Nickel  
 Geätzt: Kupfer

**Mechanische Verbesserungen:**

Kriechverhalten / Festigkeit / Widerstand gegen Alterung

**Andere Beständigkeiten:**

Feuchtigkeit / Temperatur / Korrosion

**Beschichtbare Bauteile:**

SL, LS, PJM, FLM, DLP

**Schichtdicke:**

ca. 100 µm

**Kosten:**

ca. 30-40 % der Herstellungskosten des Bauteils



# BESCHICHTUNGSVERFAHREN - GALVANISIEREN



[Jens.Bohnet ]

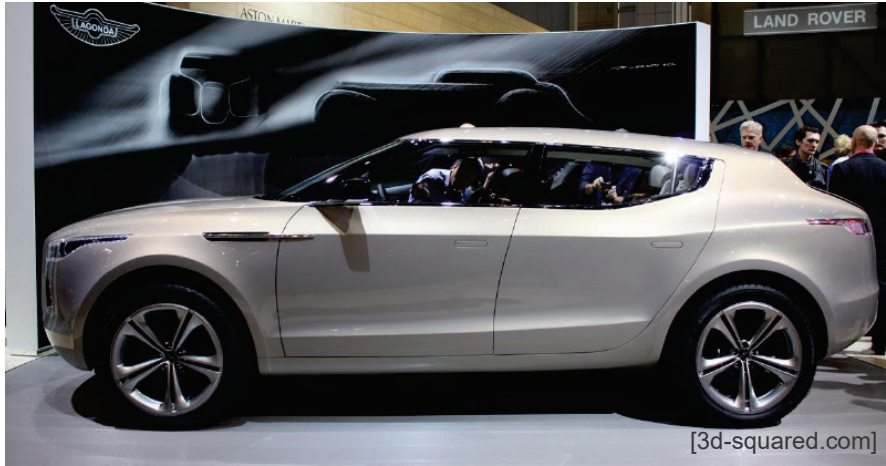


[Jens.Bohnet ]

## 7 Postprocessing

# BESCHICHTUNGSVERFAHREN - GALVANISIEREN

- Eingesetzt bei Teilen des Innenraums des Aston-Martin Prototypen „Lagonda“
- Nickel-glanz Beschichtung
- Erzeugung eines Looks wie gebürsteter Stahl durch Abbürsten der Beschichtung



# BESCHICHTUNGSVERFAHREN - GALVANISIEREN

## Vorteile

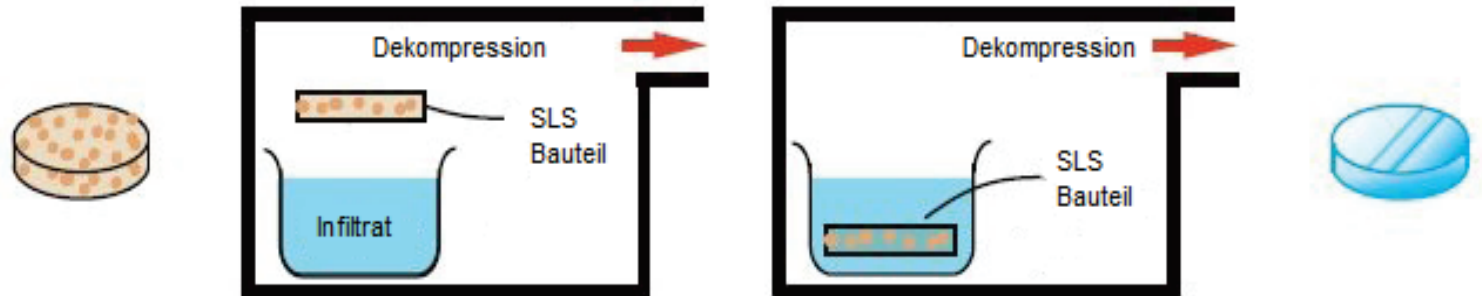
- + Steigerung der mechanischen Eigenschaften
- + Metallische Optik
- + Metallische Haptik
- + Günstig
- + Automatisierbar

## Nachteile

- Funktionsintegration schwierig
- Hinterschneidungen / Bohrungen etc. schwer zu realisieren
- Oberflächenaktivierung notwendig
- Haftfestigkeit abhängig von Vorbehandlung

# BESCHICHTUNGSVERFAHREN - INFILTRIEREN

Prozessschritte



## 7 Postprocessing

# BESCHICHTUNGSVERFAHREN - INFILTRIEREN

### Vorteile

- ⊕ Einebnungseffekt
- ⊕ Funktionalitätsherstellung
- ⊕ Glanzeffekt
- ⊕ Verbesserung der mechanischen, thermischen, elektrischen, chemischen Eigenschaften

### Nachteile

- ⊖ Dauer
- ⊖ Gewichtszunahme



Additive Fertigung

# Additive Fertigung 21 – 07

## Postprocessing

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

