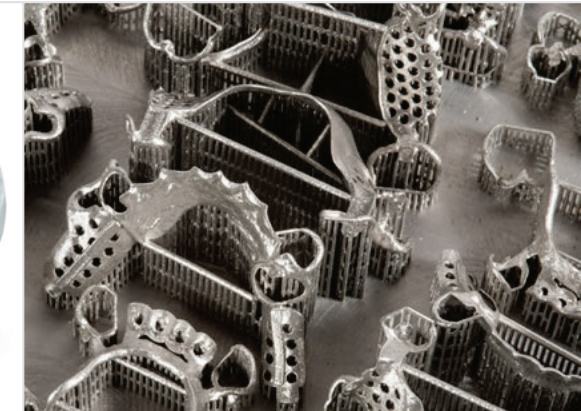
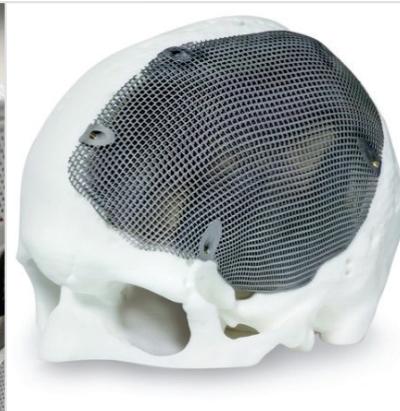


# FERTIGUNGSPLANUNG IN DER ADDITIVEN FERTIGUNG



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

8	Nachbearbeitung von additiv gefertigten Teilen	
	8.1	Mechanische Nachbearbeitung von 3D Oberflächen
	8.2	Elektrochemisches Polieren
	8.3	Plasma-elektrolytisches Polieren

# NACHBEARBEITUNG DER OBERFLÄCHEN VON ADDITIV GEFERTIGTEN BAUTEILEN

Nachbearbeitungsverfahren (Auszug)			
Oberflächenbearbeitung			Oberflächenbeschichtung
Mechanisches Abtragen	Chemisches Abtragen	Thermisches Abtragen	Beschichten
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Partikelstrahlen</li> <li>➤ Schleifen</li> <li>➤ Gleitschleifen</li> <li>➤ Polieren</li> <li>➤ Trennen mit geom. bestimmter Schneide</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Trockenätzung</li> <li>➤ Nassätzen</li> <li>➤ Elektrochemisches Polieren</li> <li>➤ Plasma-elektrolytisches Polieren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Energiestrah-Verfahren</li> <li>➤ Ohne Flammenkontakt</li> <li>➤ Mit Flammenkontakt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Thermisches Spritzen</li> <li>➤ Physikalisch / Chemisches Abscheiden</li> <li>➤ Lackierverfahren</li> </ul>

# KRITERIEN ZUR AUSWAHL VON NACHBEHANDLUNGSVERFAHREN

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

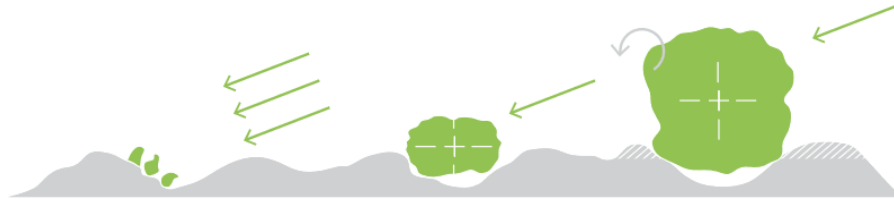


## KRITERIEN ZUR AUSWAHL VON NACHBEHANDLUNGSVERFAHREN

	Zeit	Kosten	Effizienz	Geom. Komplexität
Mechanische Oberflächenbearbeitung	✗	✓	✓	✗
Physikalisch – chemische Verfahren	○ ✓	○	○ ✓	✓
Beschichtungsverfahren	○	○	✓	✓
Chemische nichtschichtbildende Verfahren	✗	✓	✗	○

## MECHANISCHE NACHBEARBEITUNG VON AM OBERFLÄCHEN

- Für die Verringerung verfahrensbedingter Oberflächenrauheit von additiv gefertigten Bauteilen wird häufig das Verfahren *Strahlspanen* (auch *Partikelstrahlen* oder *Strahlen* genannt) eingesetzt.
- Auf die Oberfläche gelenkte Strahlmittel tragen Mikrospäne ab, glätten somit die rauen Oberflächen deutlich und steigern deren Funktionalität.
- Mit diesem Verfahren können großflächige Bauteile mit entsprechendem Strahlmittel und -methode schnell gereinigt und gefinisht werden.
- Aufgrund der Komplexität der Geometrien eignet sich das Verfahren gut zur Nachbearbeitung.
- Problematisch ist die oft manuelle / wenig reproduzierbare Durchführung.



## STRAHLVERFAHREN

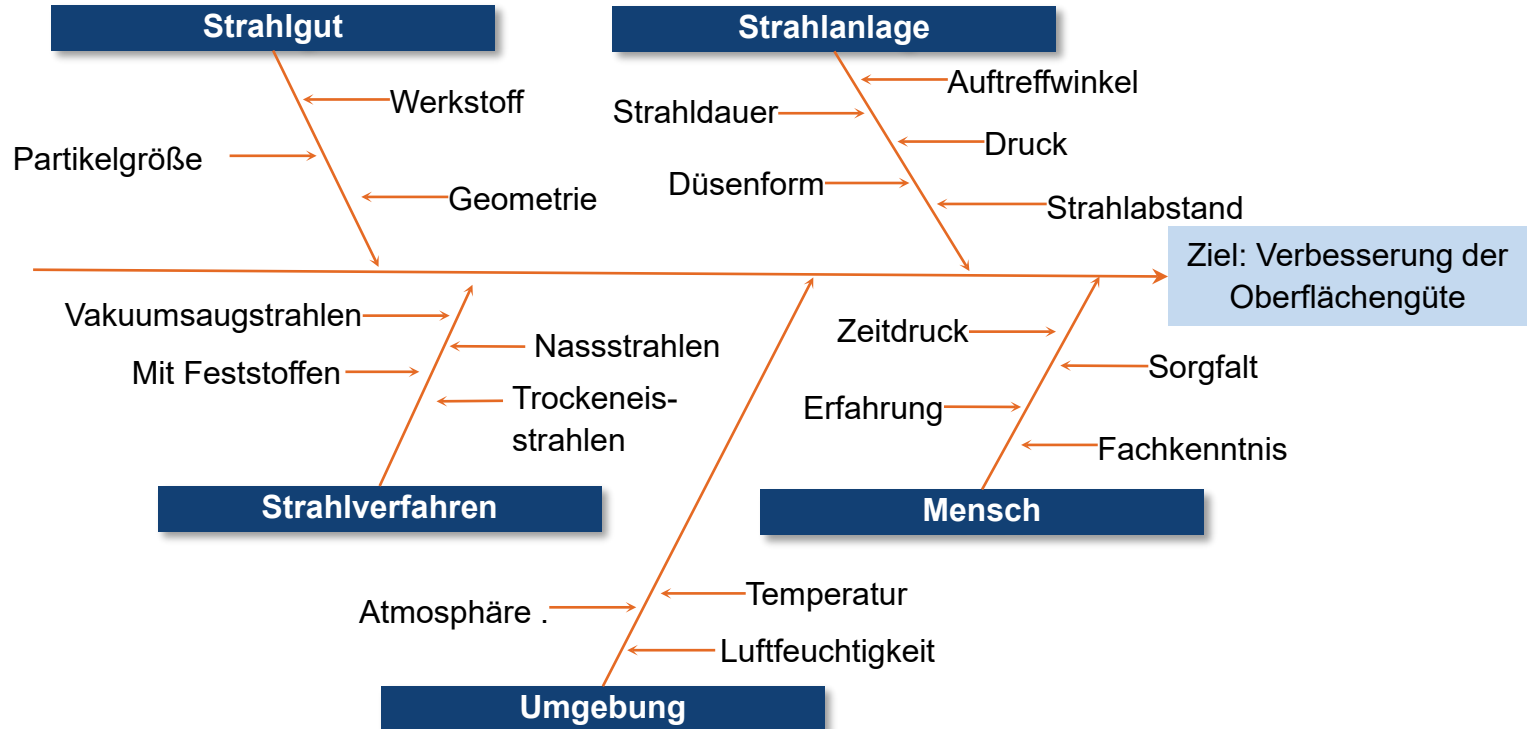
### Häufig eingesetzte Strahlverfahren

- Strahlen mit (trockenen) Feststoffen
  - Sandstrahlen / Korundstrahlen / Glasperlenst. / ....
  - Strahlen mit Trockeneis
  - Mit und ohne Trägergas
- Nassstrahlen / Lämpfstrahlen
- Vakuumsaugstrahlen

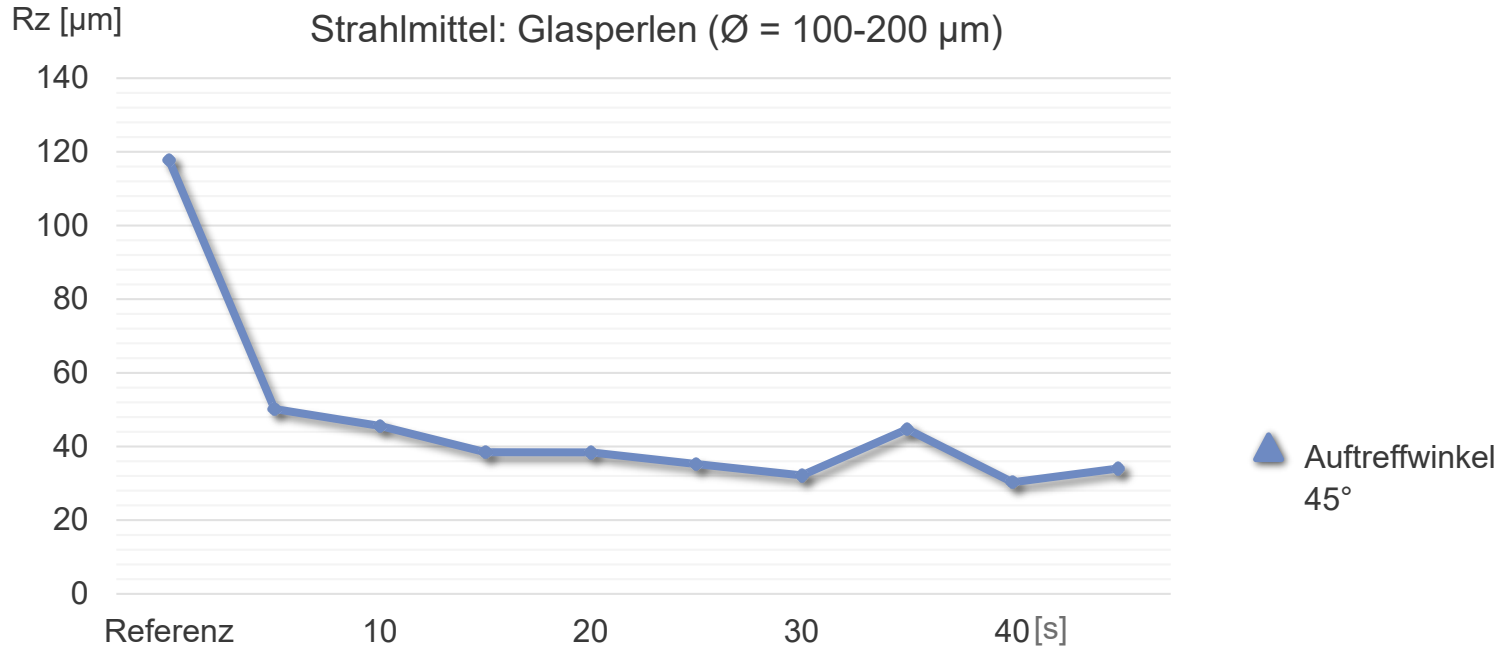
### Beispiel: Strahlen mit Feststoffen und Trägergas



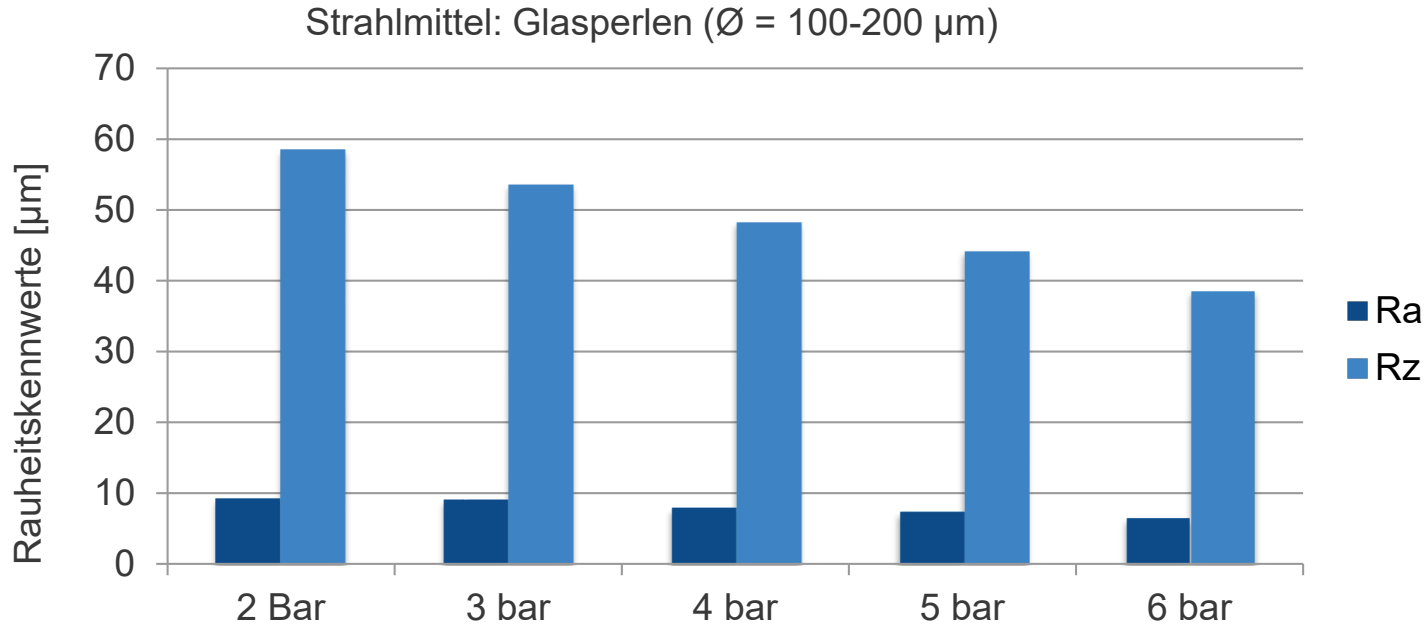
# EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ERGEBNISSE DES STRAHLENS



# ABHÄNGIGKEIT DER OBERFLÄCHENGÜTE VON DER BEARBEITUNGSZEIT (SLS)



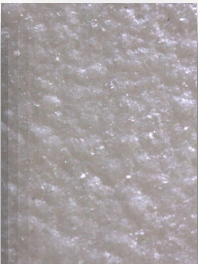




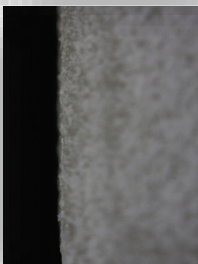
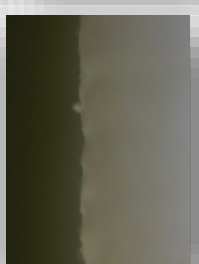



# ABHÄNGIGKEIT DER OBERFLÄCHENGÜTE VOM BEARBEITUNGSDRUCK (SLS)



# ABHÄNGIGKEIT DER OBERFLÄCHENGÜTE VOM BEARBEITUNGSDRUCK (SLS)

Strahlmittel: Glasperlen ( $\varnothing = 100\text{-}200 \mu\text{m}$ )

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

# PARTIKELSTRAHLEN

### Vorteile

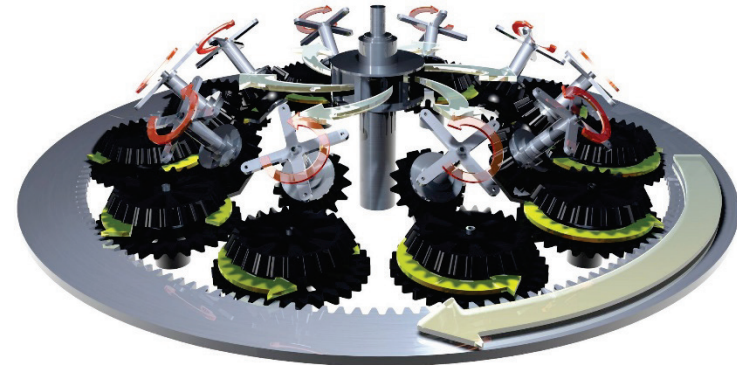
- ⊕ Nahezu Geometrieunabhängig
- ⊕ Günstig
- ⊕ Kein nennenswerter Materialabtrag
- ⊕ Reinigung der Bauteiloberfläche

### Nachteile

- ⊖ Reproduzierbarkeit
- ⊖ Schlecht automatisierbar (aber: siehe nächste Folie)
- ⊖ Nur mittlere Oberflächenqualität realisierbar

## STRAHLEN MIT AUTOMATISIERUNG („TWISTER“)

- Druckluftfreie Zuführung des Strahlgutes (zentral)
  - Gleichmäßiges Bewegen der Bauteile im Strahl (Planetengetriebe)
- ➔ Hohe Abdeckungsgrade
- ➔ Hohe Reproduzierbarkeit



<https://youtu.be/OD2DhQIMQIA>



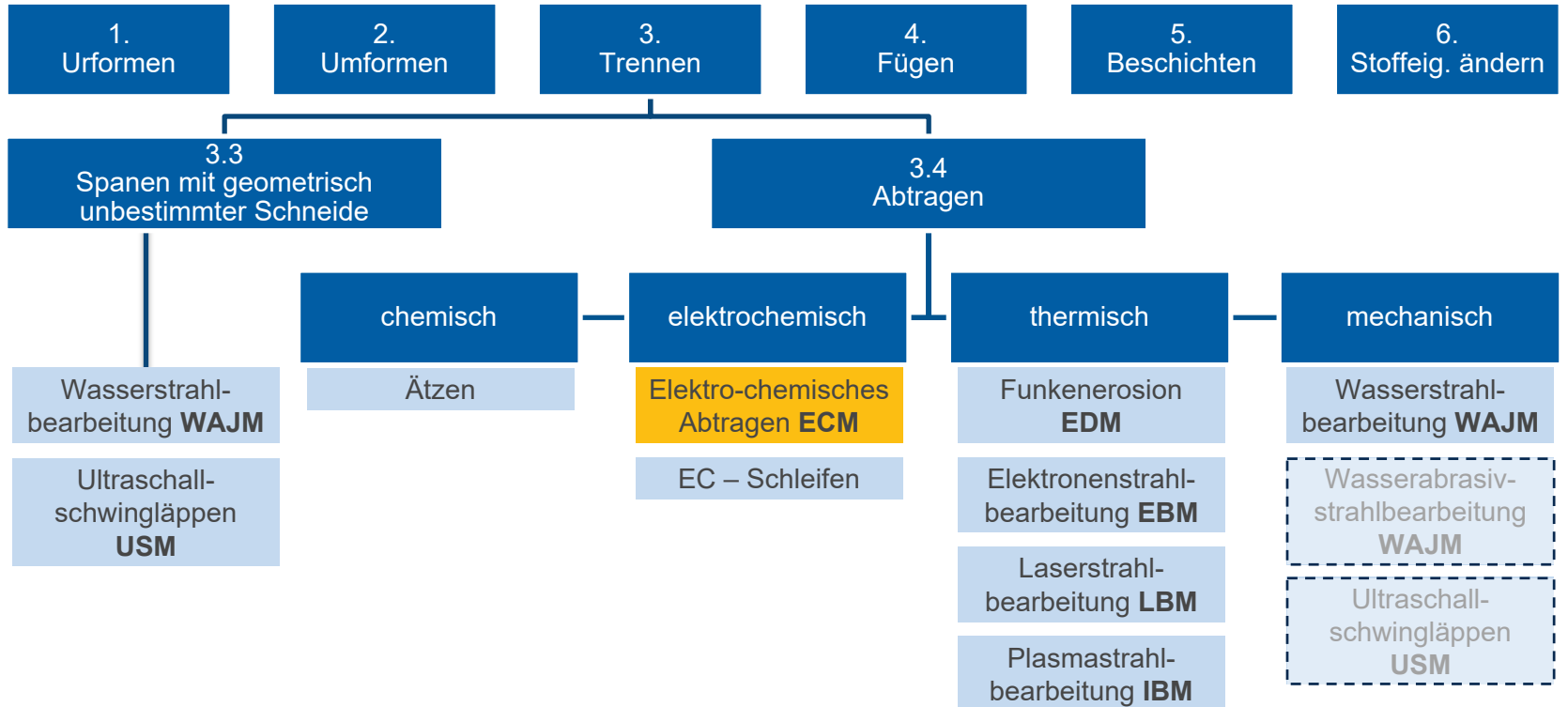
# AUFBAU DER VORLESUNG

8	Nachbearbeitung von gedruckten Teilen	
	8.1	Mechanische Nachbearbeitung von 3D Oberflächen
	8.2	Elektrochemisches Polieren
	8.3	Plasma-elektrolytisches Polieren

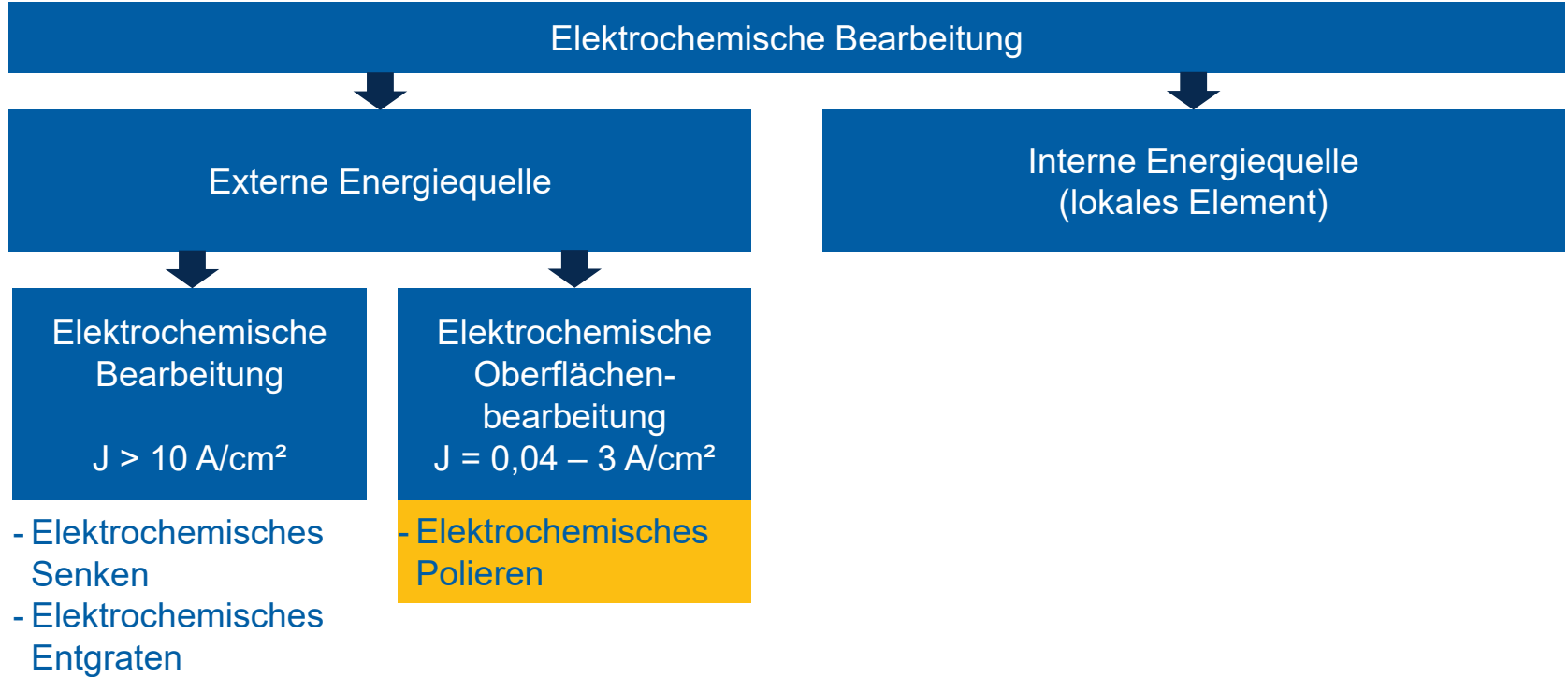
## ELEKTROCHEMISCHES POLIEREN

- **Ziel:** Abtragen der oberflächennahen Werkstoffschichten ohne mechanische und thermische Belastung  
Glättung der Oberfläche
  
- **Lösung:** Elektrochemisches Polieren

## EINORDNUNG I



## EINORDNUNG II



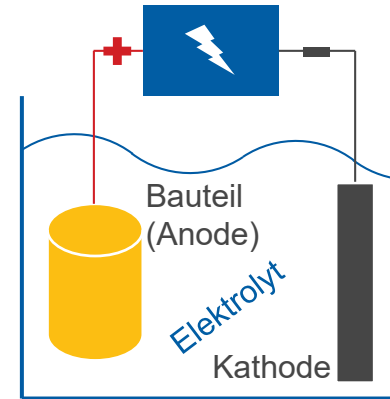
# ELEKTROCHEMISCHES POLIEREN – PRINZIP

Umkehrung des galvanischen Prozesses

- Metallabtragung in einem Elektrolyt (Lösung mit hoher Leitfähigkeit) von einer Werkstückoberfläche unter Gleichspannungseinwirkung
- Bauteil bildet den Pluspol (Anode), Minuspol (Kathode) ist anlagenseitig ausgeprägt.
- Unter Spannungszuschaltung 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 A/dm<sup>2</sup>
- Polierdauer
  - i.d.R. im Bereich von Minuten
- Abstand (und damit auch oft Form) der Kathode



## ENTFERNUNG DER RANDZONE

### Elektropolieren (EP)

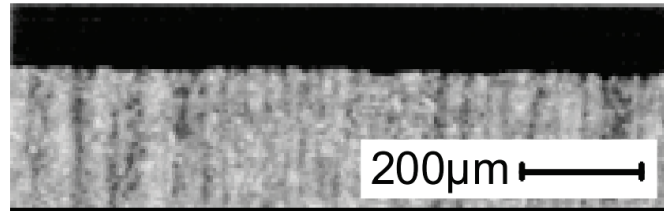
- Kurze Bearbeitungszeit (Minuten)
- Hohe Reproduzierbarkeit (kein mechanischer Einfluss)
- Flächiger Abtrag
- Hohe Oberflächengüte



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

### Vergleich: Manuelle Nachbearbeitung

- Lange Polierzeiten
- Eingeschränkte Reproduzierbarkeit in Hinblick auf:
  - Abtrag der Randzone
  - Maßhaltigkeit
  - Formgenauigkeit
  - Oberflächengüte



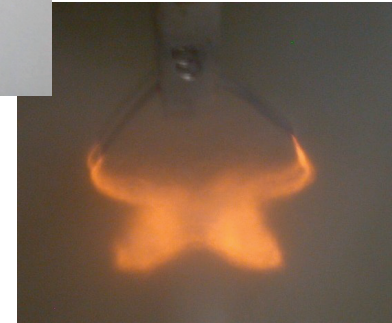
keine Randzonenbeeinflussung

# AUFBAU DER VORLESUNG

8	Nachbearbeitung von gedruckten Teilen	
	8.1	Mechanische Nachbearbeitung von 3D Oberflächen
	8.2	Elektrochemisches Polieren
	8.3	Plasma-elektrolytisches Polieren

# PEP – PLASMAELEKTROLYTISCHES POLIEREN

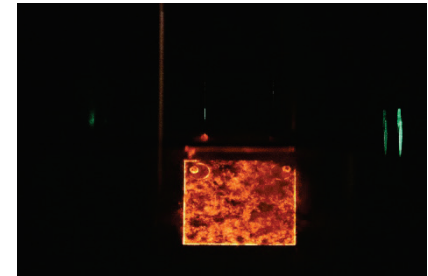
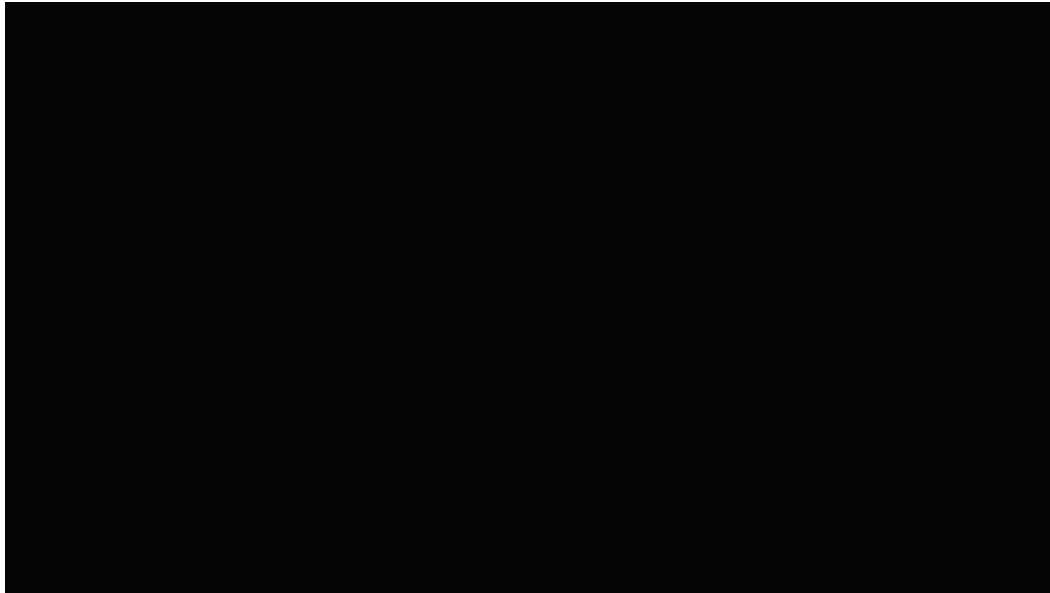
- Elektrolytttemperaturen: 60°C bis 90°C
- Hohe elektrische Potentiale:  
 $180V \leq u_{PEP} \leq 400V$
- Hochgradig werkstoffspezifische Elektrolyte notwendig
- wasserbasierte Elektrolyte mit geringem Salzgehalt von 3% bis 5%
- Geringe Stromdichten im Bereich von 0,1 A/cm<sup>2</sup> bis 0,3 A/cm<sup>2</sup>
- Elektrolytisches Plasma unter Atmosphärendruck (1 bar)
- Bearbeitung komplexer Oberflächengeometrien möglich
- Kurze Prozesszeiten von wenigen Minuten


 Unpoliertes  
Werkstück

 PEP-  
Prozess

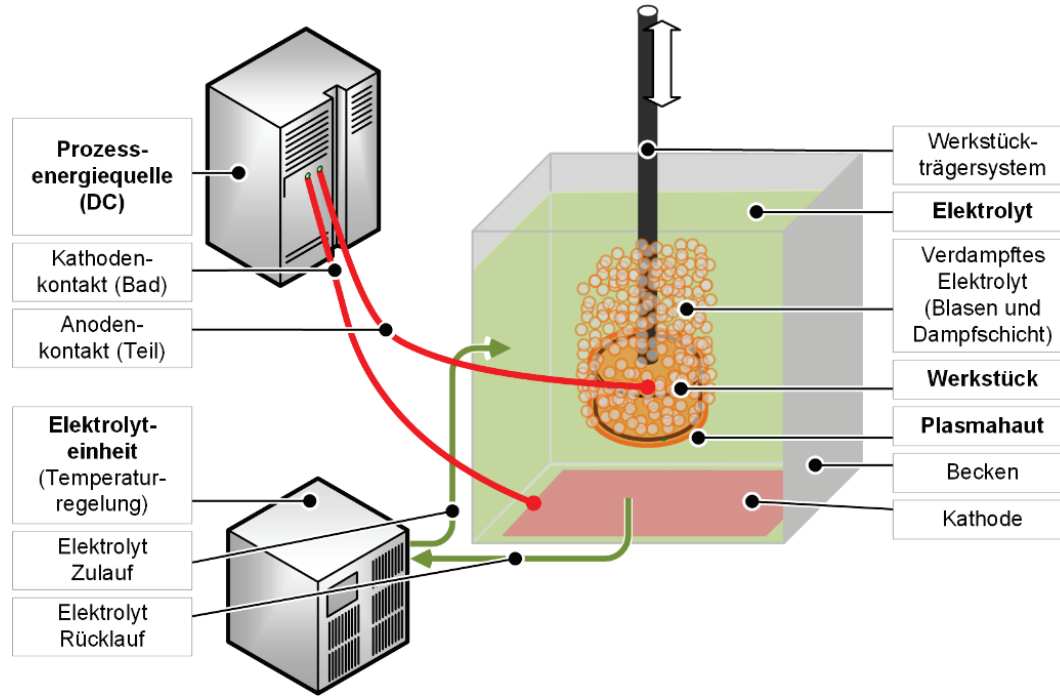
 Poliertes  
Werkstück

Fertigungsplanung in der Additiven Fertigung

# PEP – PLASMAELEKTROLYTISCHES POLIEREN



# PEP – PLASMAELEKTROLYTISCHES POLIEREN

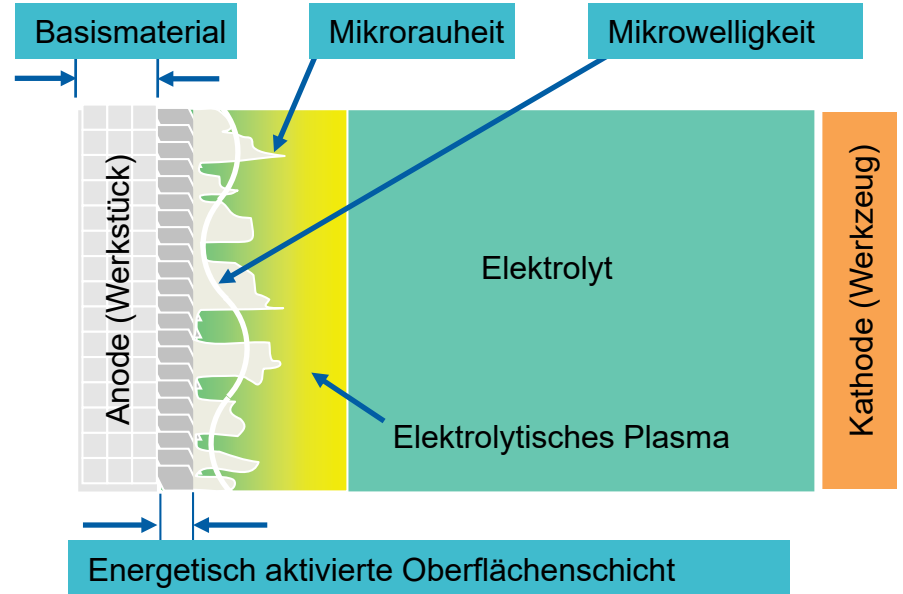


# PEP – PLASMAELEKTROLYTISCHES POLIEREN

Synonym: **Plasmapolieren**

Prinzip:

- Kathodisch gepolter Elektrolytbehälter
- Anodisch gepoltes Werkstück
- Ausbildung eines elektrolytischen Plasmas in der Nähe der Anode
- Besonderheit: Plasma entsteht unter Normaldruck in Flüssigkeit



Prinzipdarstellung des PEP

Quellen: Beckmann-Institut

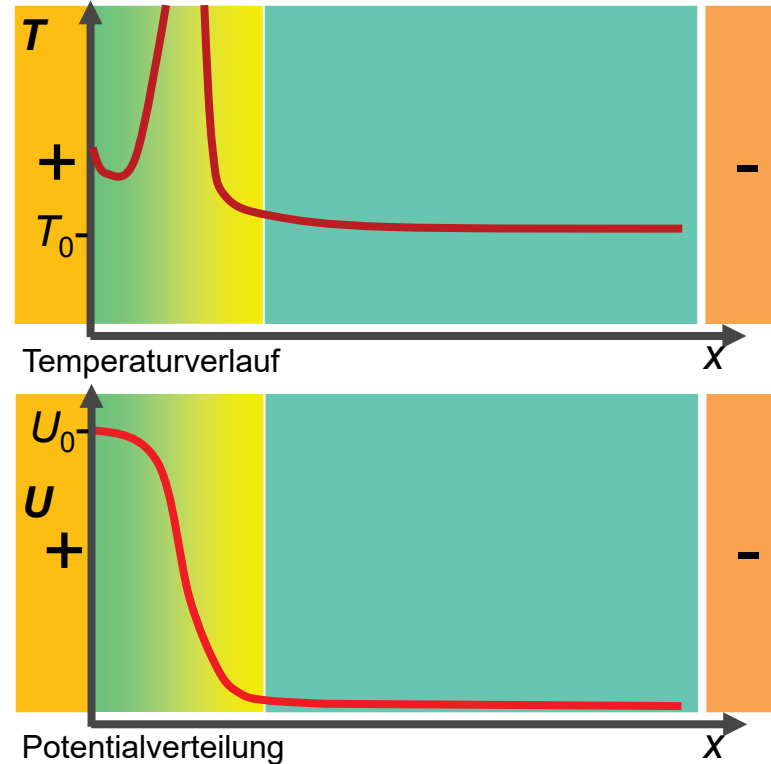
# PEP - POTENTIAL- UND TEMPERATURVERTEILUNG

## Temperaturverlauf

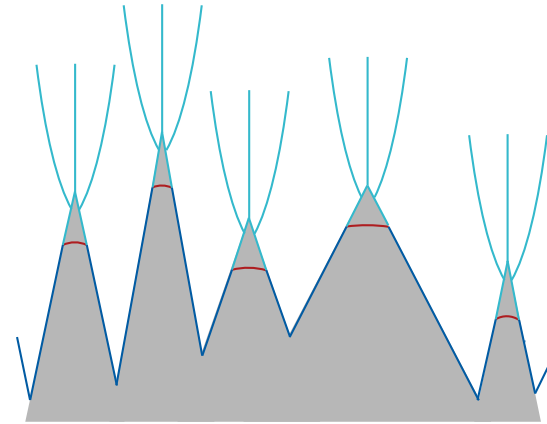
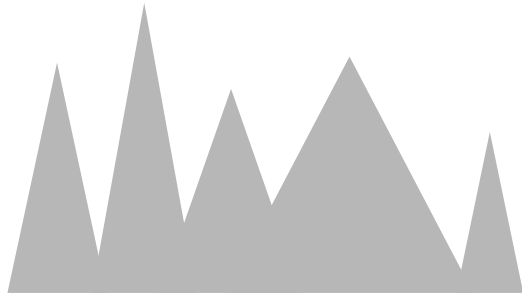
- Starker Anstieg der Temperatur im Bereich des Plasmas bis zu mehreren 1000 K
- Nur geringfügig erhöhte Temperatur an der Werkstückoberfläche → ca. 100°C (Siedetemperatur Elektrolytlösung)

## Potentialverteilung

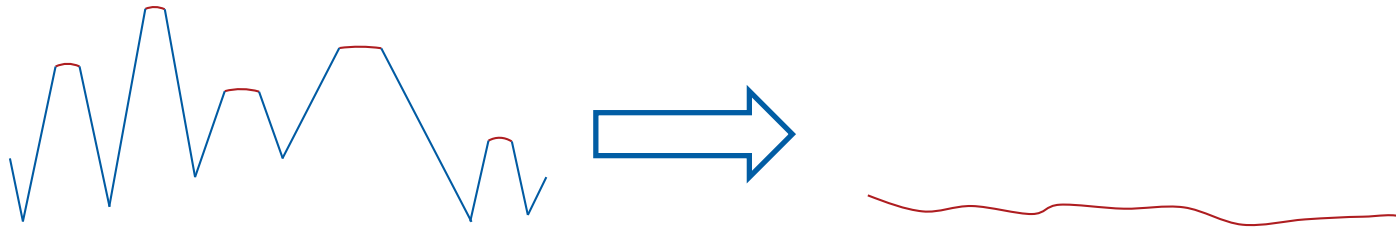
- Lokalisierter Abfall des elektrischen Potentials im Bereich des Plasmas



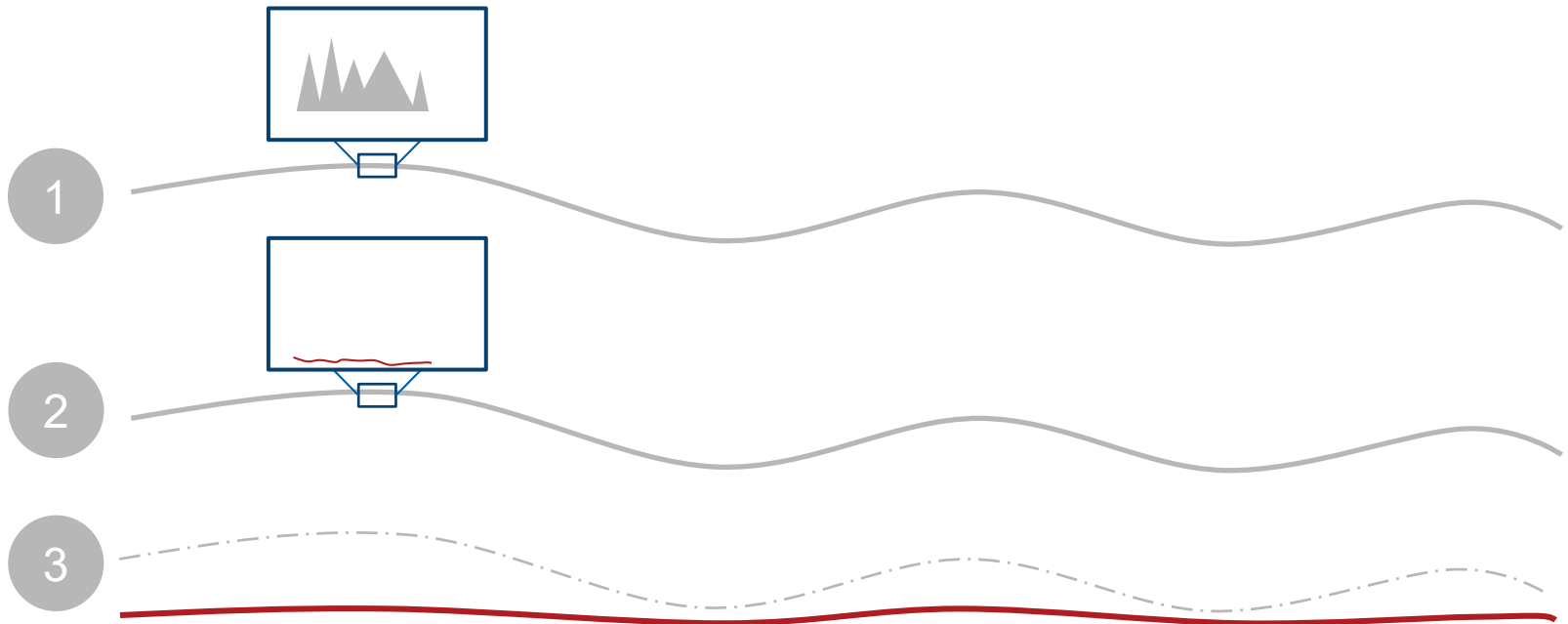
# PeP - OBERFLÄCHENENTWICKLUNG



# PeP - OBERFLÄCHENENTWICKLUNG

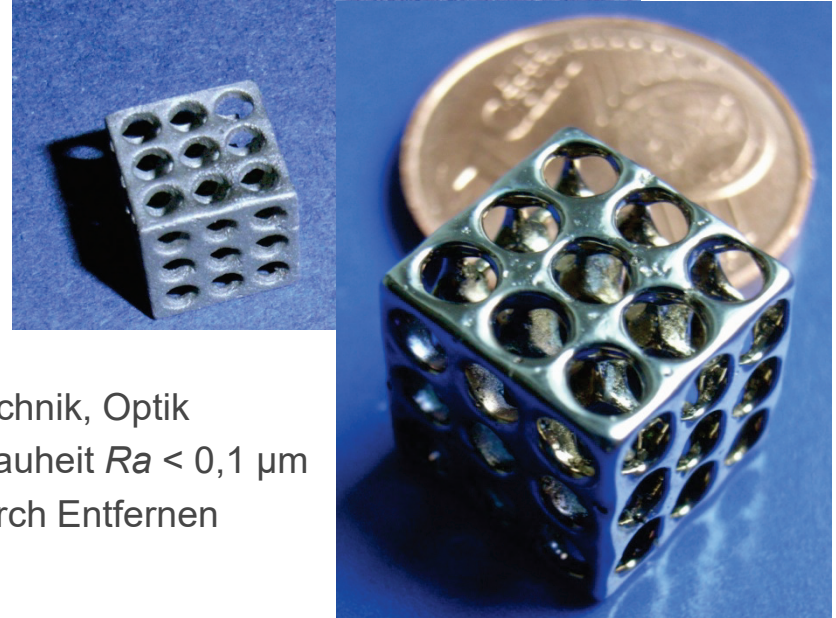


# PeP - OBERFLÄCHENENTWICKLUNG



# BEARBEITBARE WERKSTOFFE / ANWENDUNGSGEBIETE

- Stähle, eisenbasierte Werkstoffe
- Kupfer, Kupferlegierungen
- Titan, Titanlegierungen
- Leichtmetalllegierungen
- Speziallegierungen



## Anwendungen / Eigenschaften

- Medizintechnik, Additive Fertigung, Mikrotechnik, Optik
- Polieren, Glätten, Entgraten: erreichbare Rauheit  $Ra < 0,1 \mu\text{m}$
- Reinigen / Sterilisieren von Oberflächen durch Entfernen organischer Schichten
- Temporärer Korrosionsschutz
- Bearbeitung komplexer Strukturen

Glätten und Polieren eines Präzisionsgussteils

# AM PART PEP

### AM (SLM) part

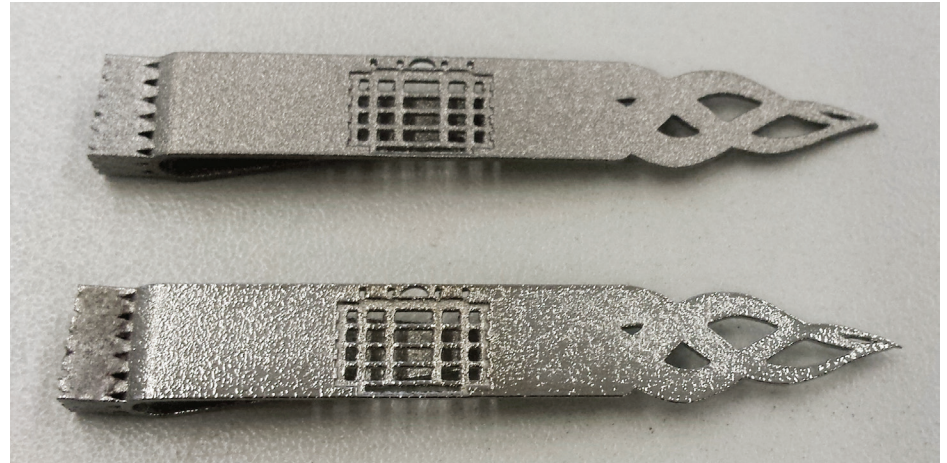
- Material: 316l steel
- Target: smooth surface, gloss and shine increase
- Pre-treatment: corundum blasting
- > Gloss enhancement and roughness decrease
- > Reduction of built step visibility



# AM PART PEP

### AM (SLM) part

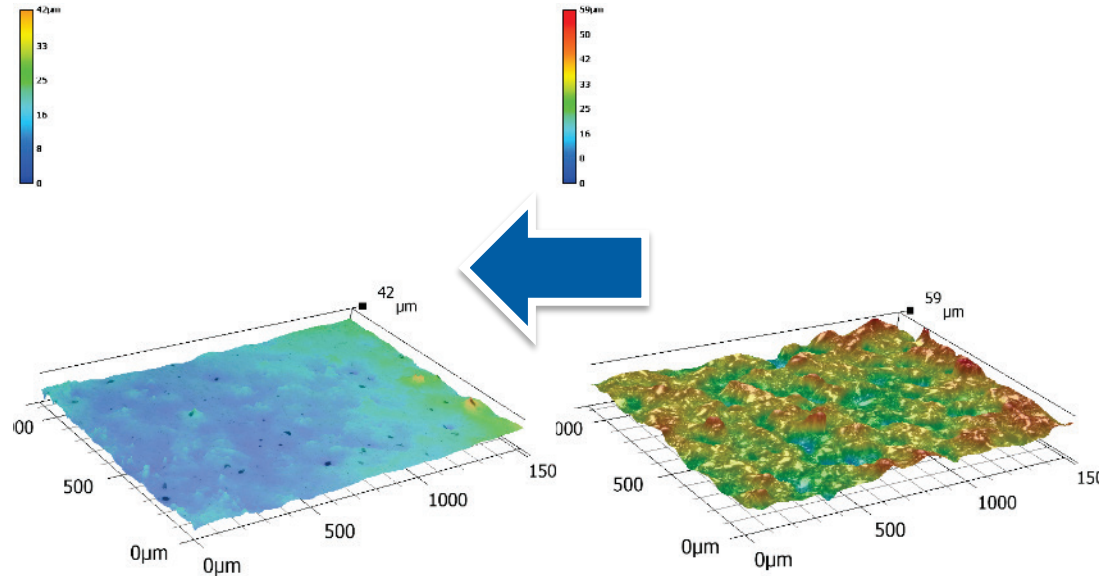
- Material: Ti6Al4V
- Target: gloss and shine increase
- Pre-treatment: corundum blasting
- > Gloss enhancement
- > Build step visibility



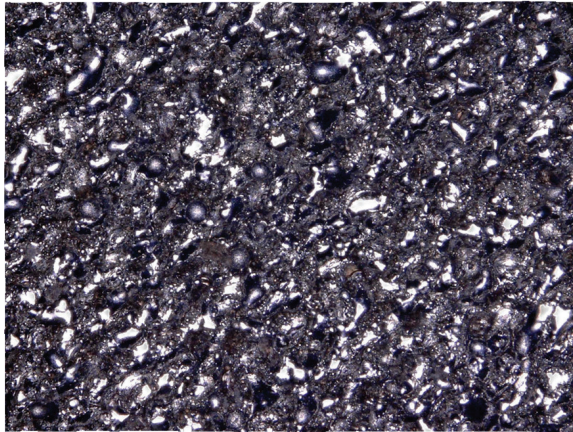
# AM SURFACE CHANGE AFTER PeP

## AM (SLM) part

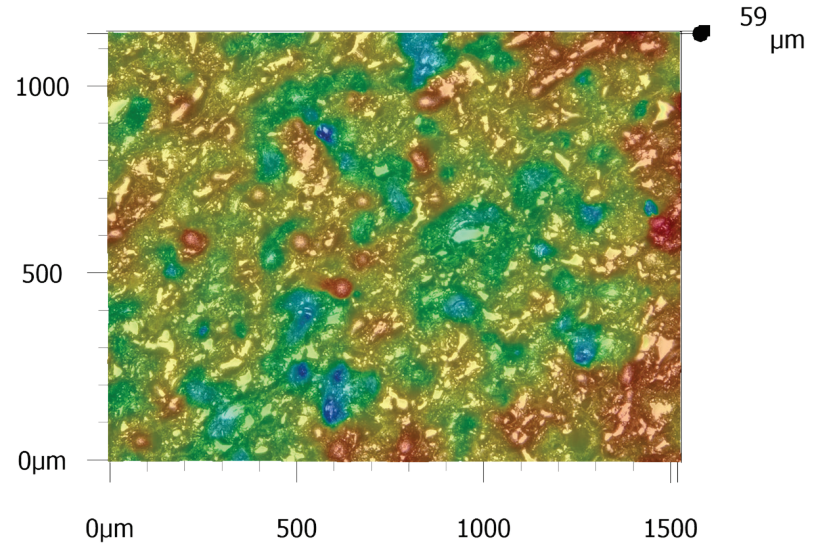
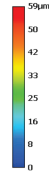
- Material: 316l steel
- Polishing time 40min.
- Pre-treatment: nil
- > Gloss enhancement and roughness decrease
- > Reduction of built step visibility



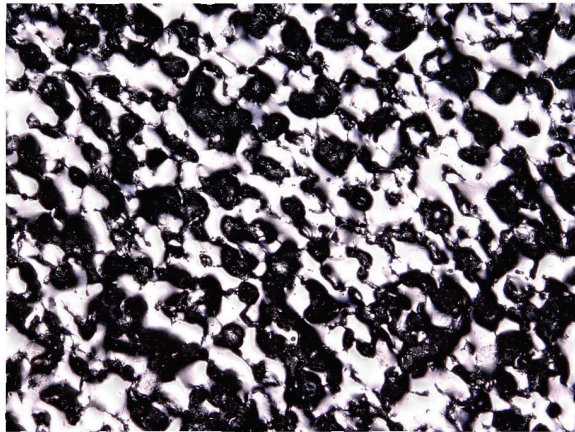
# AM PeP



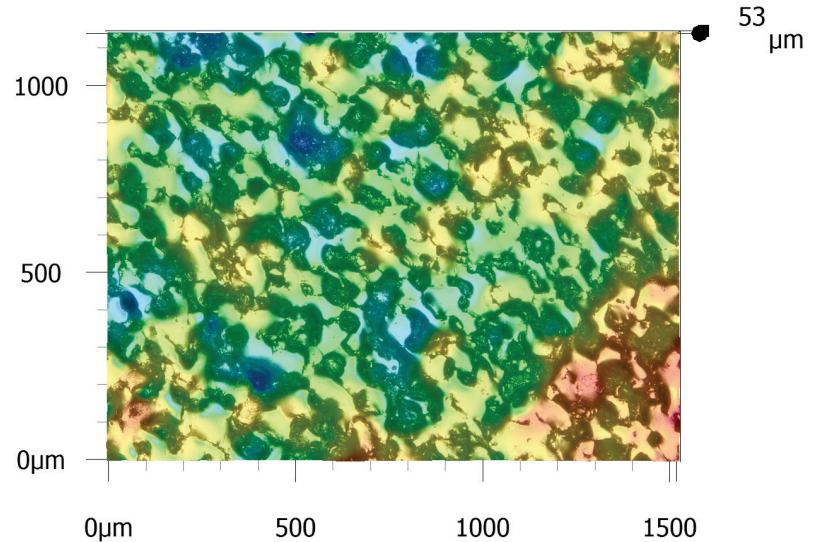
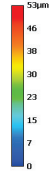
Steel SLM part, 2min. PeP



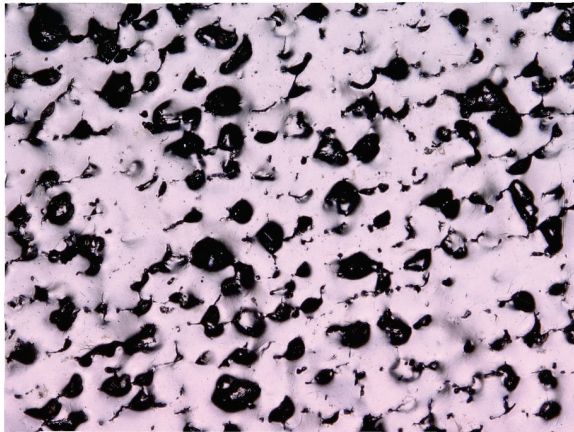
## AM PeP



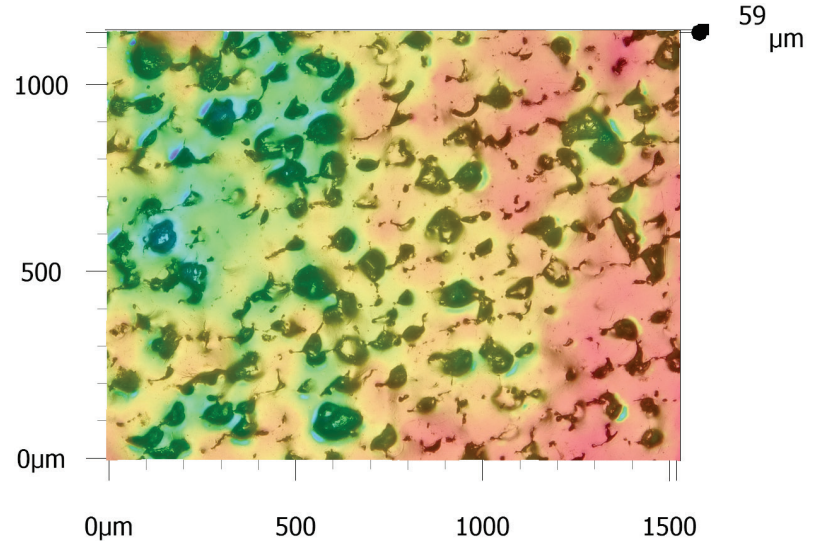
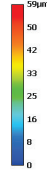
Steel SLM part, 8 min. PeP



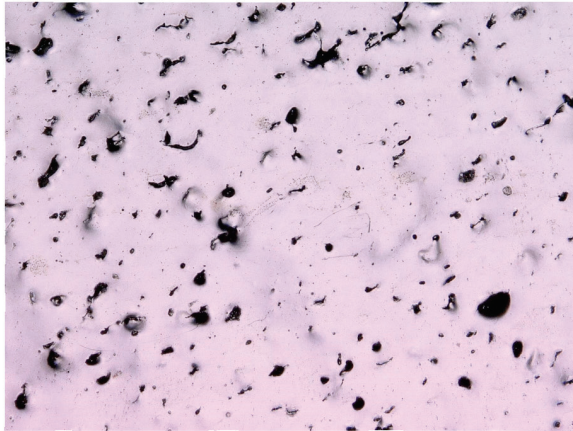
# AM PeP



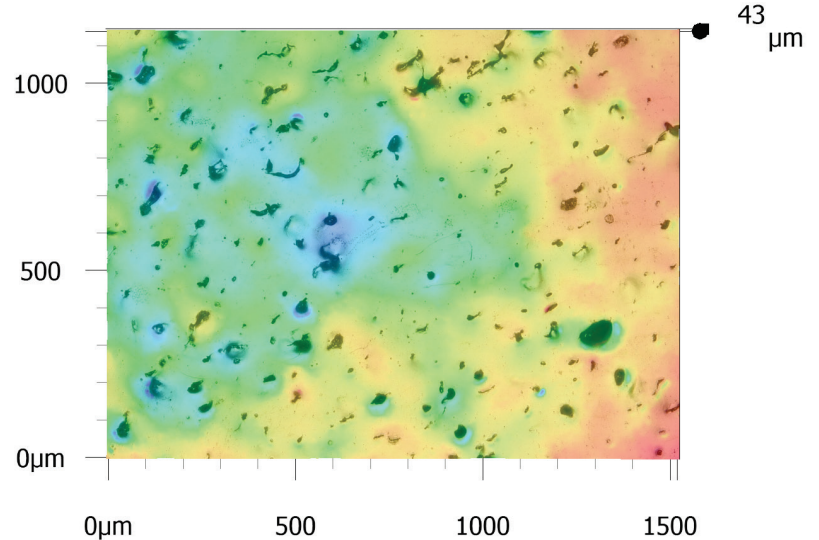
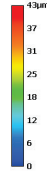
Steel SLM part, 16 min. PeP



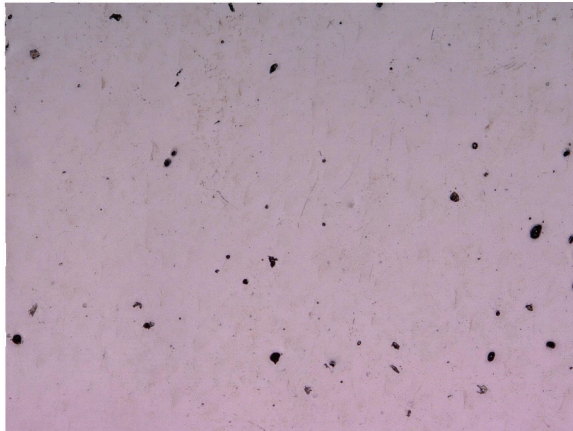
# AM PeP



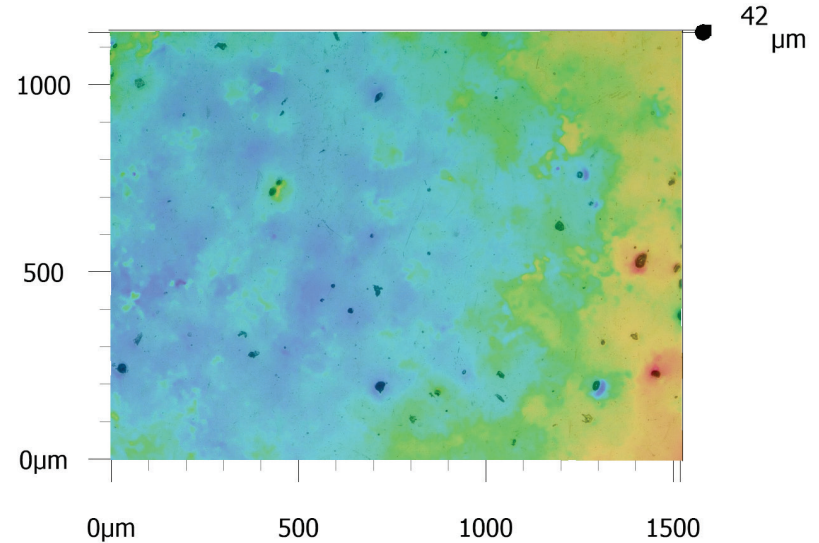
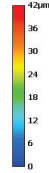
Steel SLM part, 30 min. PeP



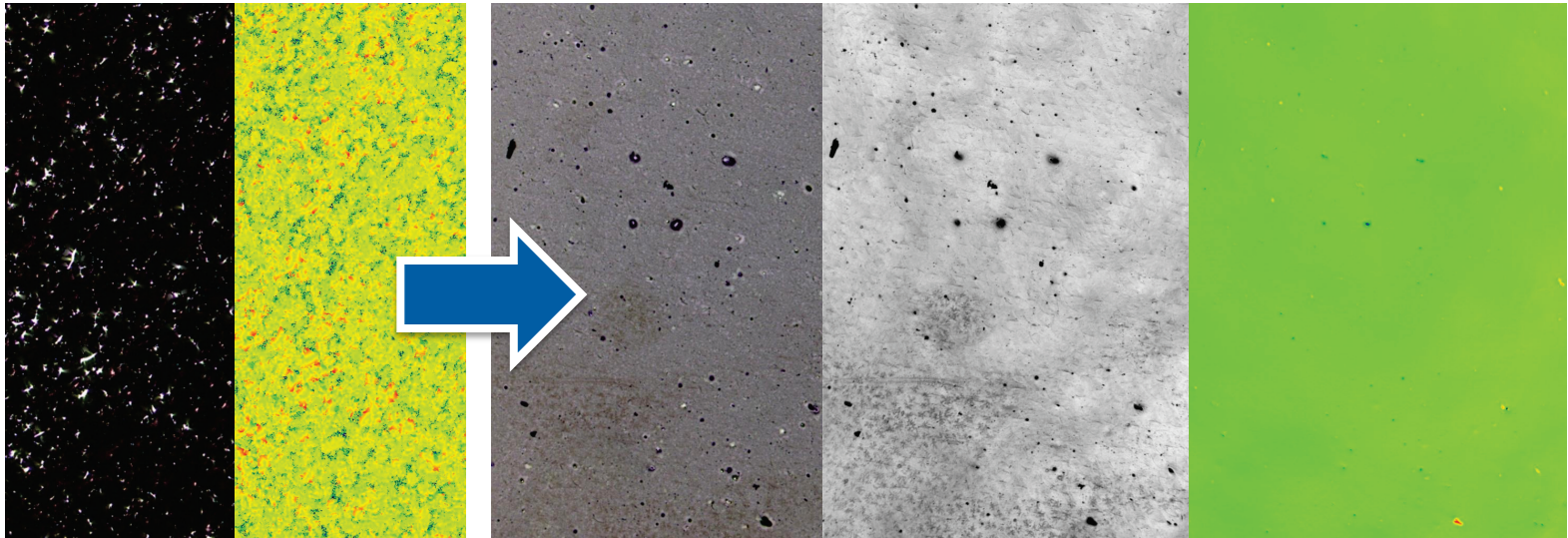
# AM PeP



Steel SLM part, 40 min. PeP

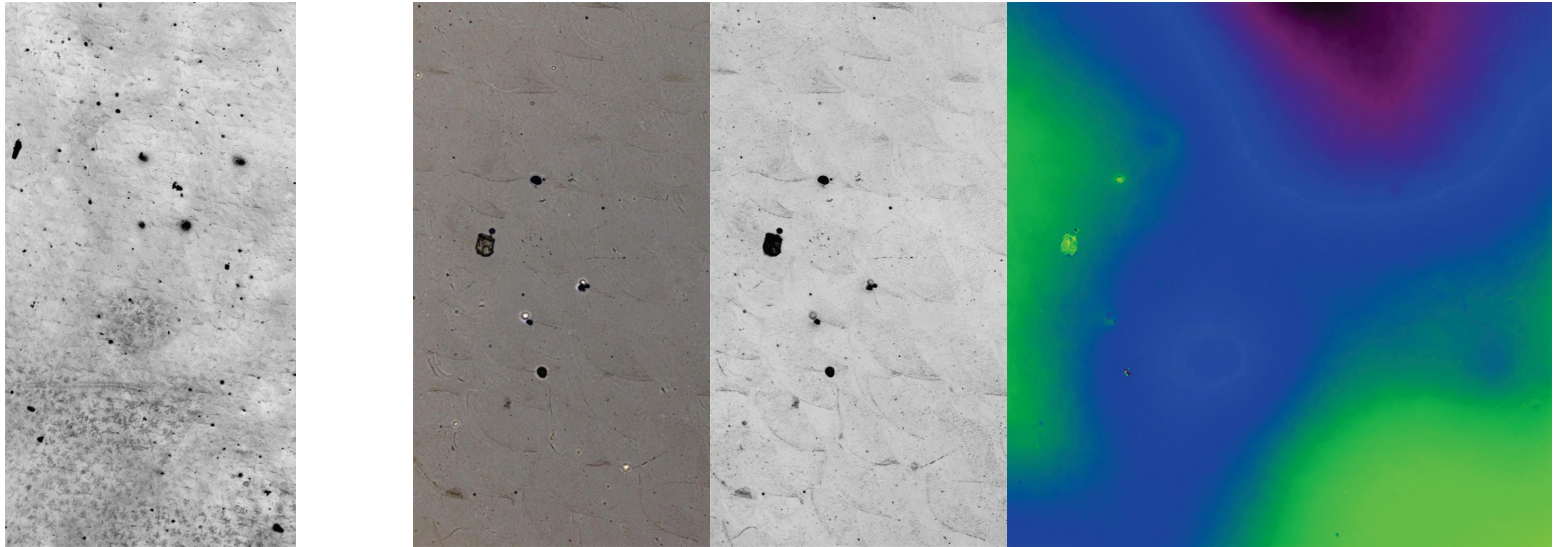


## AM PeP



Steel SLM part, 2min/30min PeP, LEXT imaging

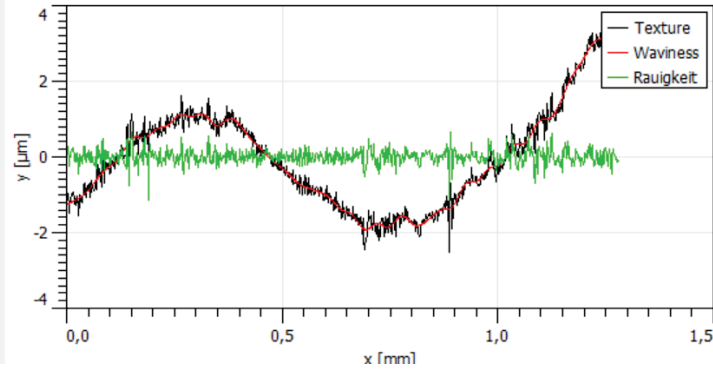
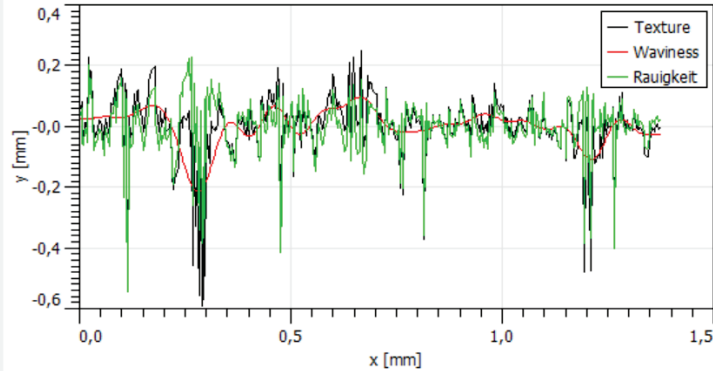
## AM PeP



Steel SLM part, 30min PeP, LEXT imaging (right side: higher magnification)

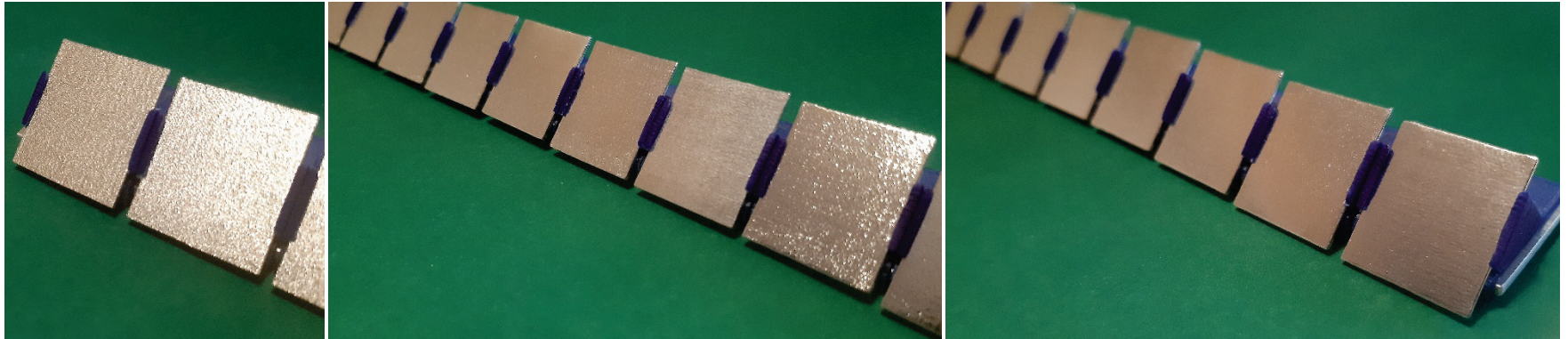
# Plasma electrolytic polishing of AM parts

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 $\mu\text{m}$
$R_{3z\text{ ISO}}$	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 $\mu\text{m}$
$R_{3z\text{ ISO}}$	Average third highest peak to third lowest valley height	802,2 nm



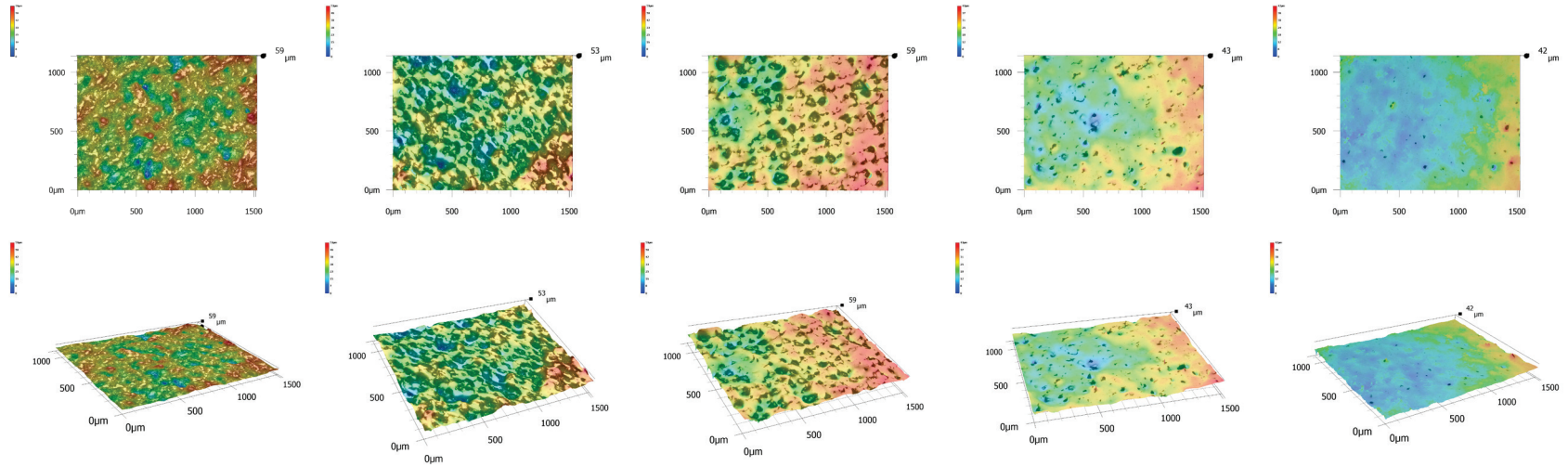
Steel SLM part,  
2min/30min PeP,  
LEXT imaging,  
gwyddion analysis  
Careful: not acquired  
according to standards!

# SURFACE PROGRESSION



Steel SLM part, 0/2min 8/10/12/14min 18/20/25/30min PeP, optical imaging

# AM PeP: SUMMARY



Steel SLM part, 2-40 min. PeP

# SUMMARY

- ➔ PeP of post-processed AM parts
  - ➔ Roughness reduction
  - ➔ Gloss increase
- ➔ AM parameters can be traced with PeP
  - ➔ Scanning/hatching strategy
- ➔ Opening of pores
  - ➔ No „hiding“ of faulty parts
  - ➔ Possible deterioration of „optically viable“ surfaces



Fertigungsplanung in der Additiven Fertigung

# Fertigungsplanung in der Additiven Fertigung 2021 – 08

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

