

Wahlkurs Additive Fertigungsverfahren (AFV)

Verfahren zur Nachbehandlung
von additiv gefertigten Bauteilen

Prof. Jörg Agarico
Zentrum für Produkt- und Prozessentwicklung



Lernziele

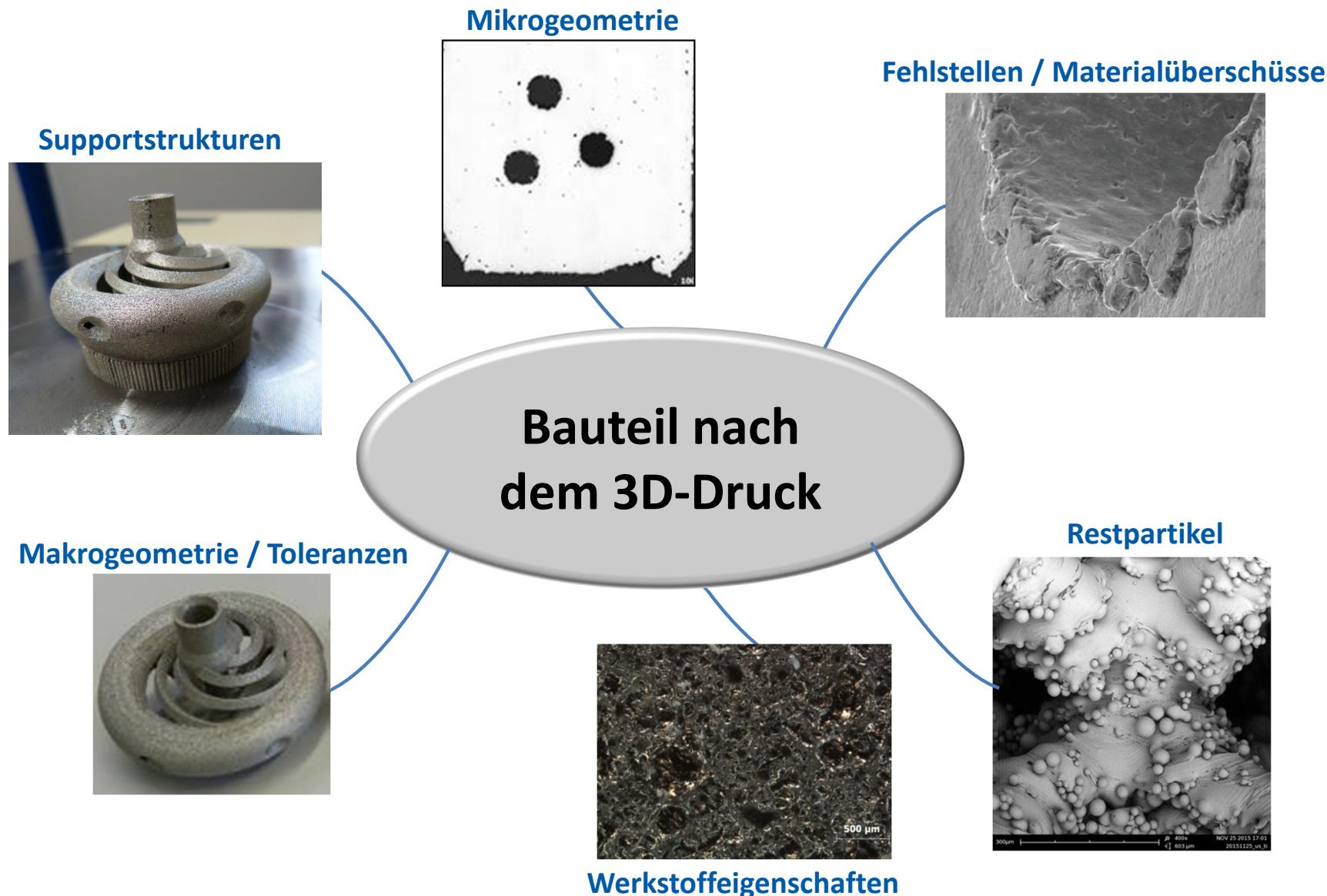
Nach den 4 Lektionen

«*Verfahren zur Nachbehandlung von additiv gefertigten Bauteilen*»

kennen Sie ...

- Nachbearbeitungsaufgaben bei 3D-gedruckten Bauteilen
- Kriterien zur Beurteilung 3D-gedruckter Bauteile
- verschiedene Nachbearbeitungsverfahren
- Auswahlkriterien für Nachbearbeitungsverfahren

Ausgangszustand



Prozesskette additiver Fertigungsverfahren

Nachbehandlung und Nachbearbeitung

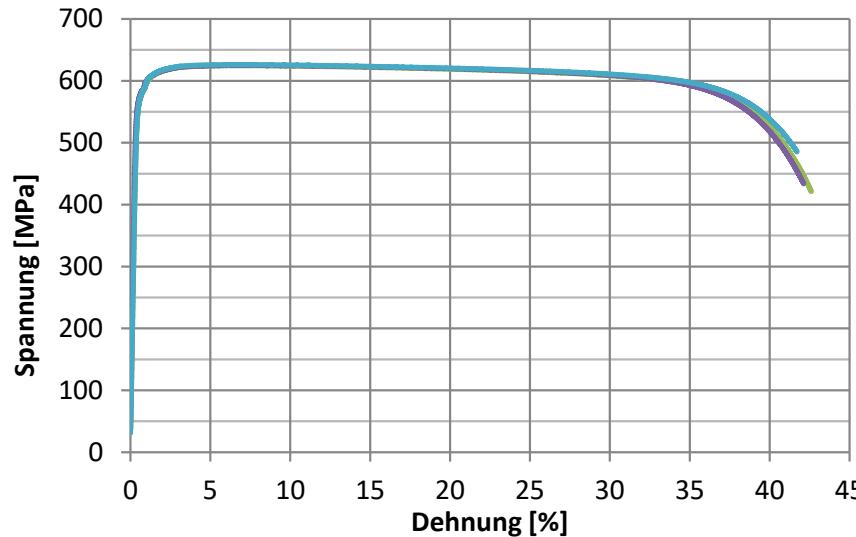
- **Arbeitsplatte** aus dem Bauraum, aus Pulver o. Flüssigkeit entfernen
- **Pulver entfernen** mittels Pinsel, Druckluft, Sauger....
- **Thermische Bearbeitung** insbesondere von metallischen Teilen (Eigenspannungen abbauen, metallurgische Struktur optimieren), typische Prozesse sind Wärmebehandlung unter Vakuum oder Schutzgas oder Hot Isostatic Pressing (HIP).
- **Ofenprozesse** für das Sintern der Grünlinge aus Keramik oder Metall
- **Infiltration** zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften, Beständigkeit oder Oberflächen
- **Entfernung der Stützstruktur** durch Brechen, Sägen, Meisseln, Erodieren
- **Spanende Nachbearbeitung** durch Drehen, Fräsen, Schleifen...
- **Oberflächenbearbeitung** durch Material Abtragen (z.B. Polieren, Strahlen, Trovalisieren) oder durch Hinzufügen von Material (z.B. Lackieren, Färben).



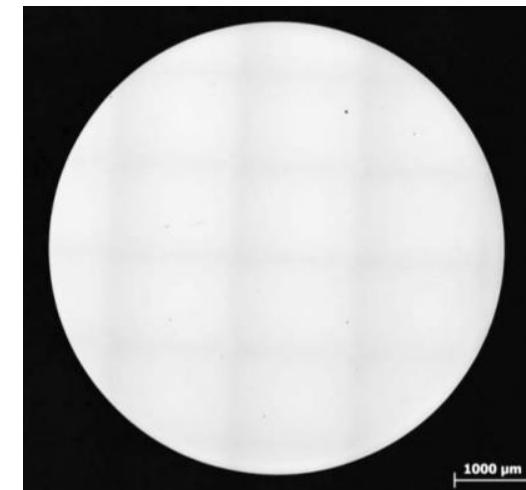
Eigenschaften nach der additiven Fertigung

Rostfreier Stahl 1.4404 (316L) SLM bearbeitet

Zugprüfung nach DIN EN ISO 6892-1



Spannungs-Dehnungs Diagramm SLM bearbeiteter rostfreier Stahl 1.4404 (316L).

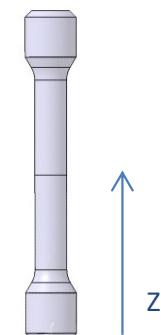


Schliffbild vom Querschnitt einer Zugprobe mit
Volumengehalt 99.9 %.

keine
interpretierbaren
Unterschiede

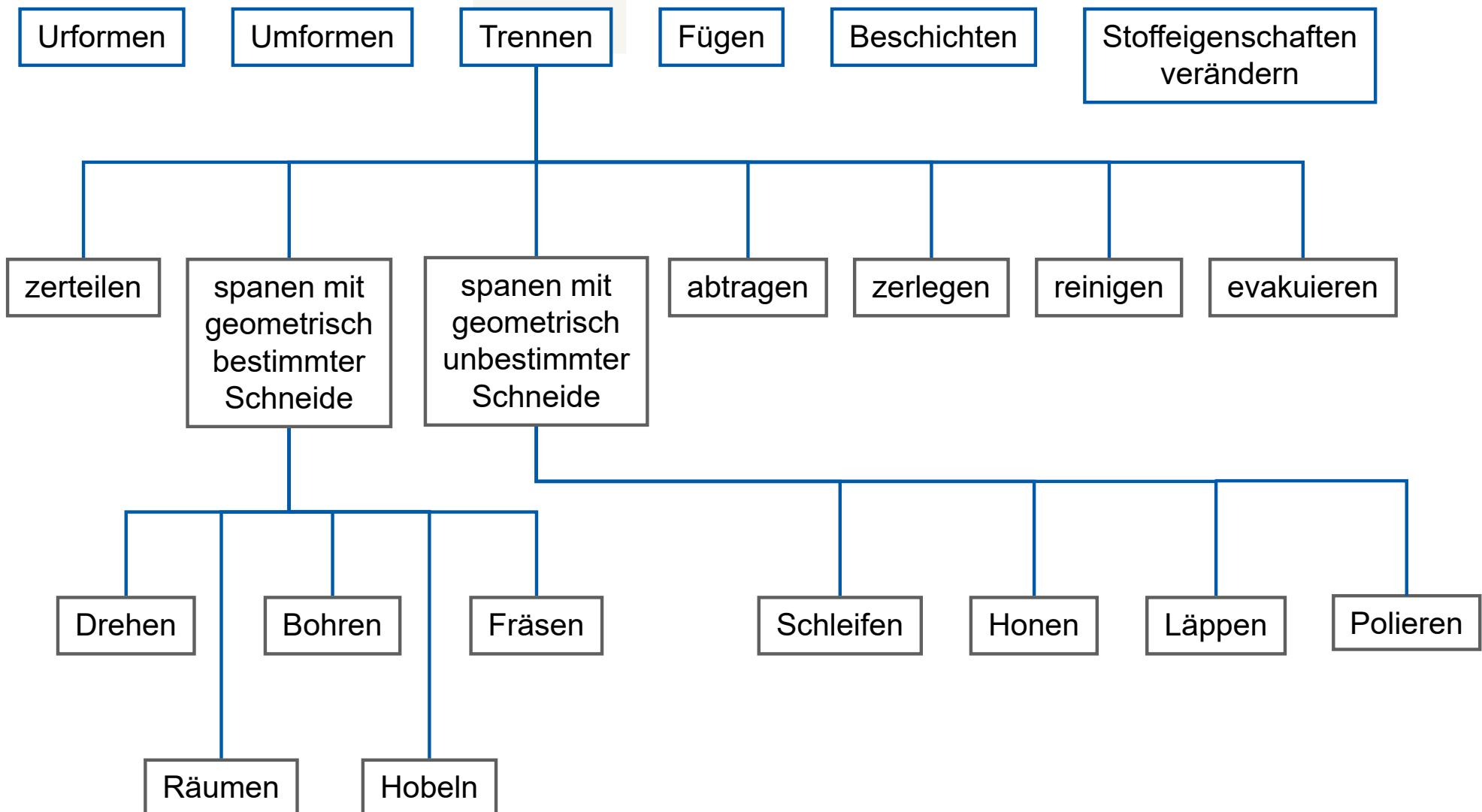


	Zugfestigkeit [MPa]	Bruchdehnung [%]	Streckgrenze [MPa]
ZPP	626	43	570
Dezember 2013			
Strahlgeschmolzen	650	25	495
gem. Concept Laser			
Stangenmaterial	500-700	≥ 40	≥ 200
gem. Stahlschlüssel	üblich: 660	üblich: 48	Üblich: 360



Zugprobe Form B mit Gewindeköpfen nach DIN
50 125, aufgebaut in Z-Richtung

Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580



Anwendbarkeit von Nachbearbeitungsverfahren für AM-gefertigte Bauteile

Weder aus den verfahrens-technischen Rahmenbedingungen noch aus den Werkstoffanalysen von AM-gefertigten Bauteilen lassen sich eindeutige Schlussfolgerungen auf Einschränkungen der Anwendbarkeit bekannter Nachbearbeitungsverfahren ziehen.

Textauszug aus VDI3405

5.3 Nachbehandlung

Additiv hergestellte Bauteile können mit bekannten nicht additiven Fertigungsverfahren bearbeitet werden, um die physikalischen Eigenschaften wie Oberflächengüte und Haptik zu verbessern.

5.3.1 Kunststoffprodukte

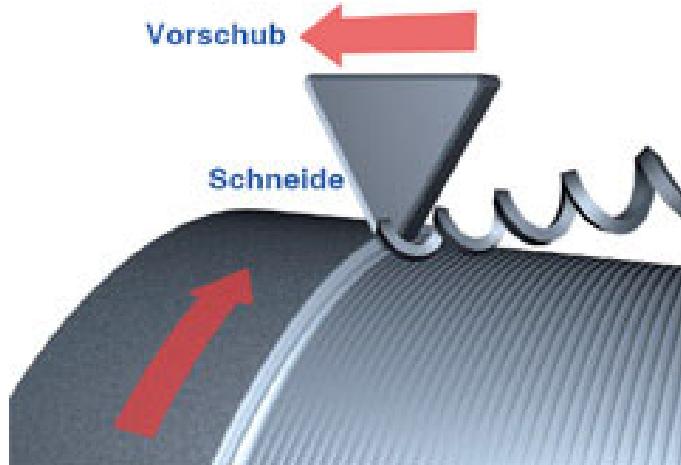
Für direkt hergestellte Kunststoffbauteile haben sich die in Tabelle 3 aufgeführten Verfahren zur Nachbehandlung etabliert.

5.3.2 Metallprodukte

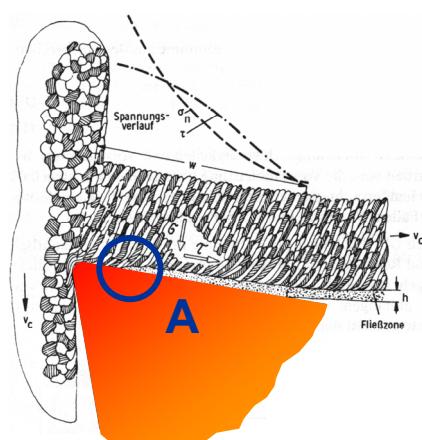
Die Nachbehandlungsschritte für Metallprodukte konzentrieren sich auf die Verbesserung der Oberflächenqualität, teilweise auf die Verbesserung von Gefüge, Dichtigkeit und Härte

Nachbearbeitungsverfahren

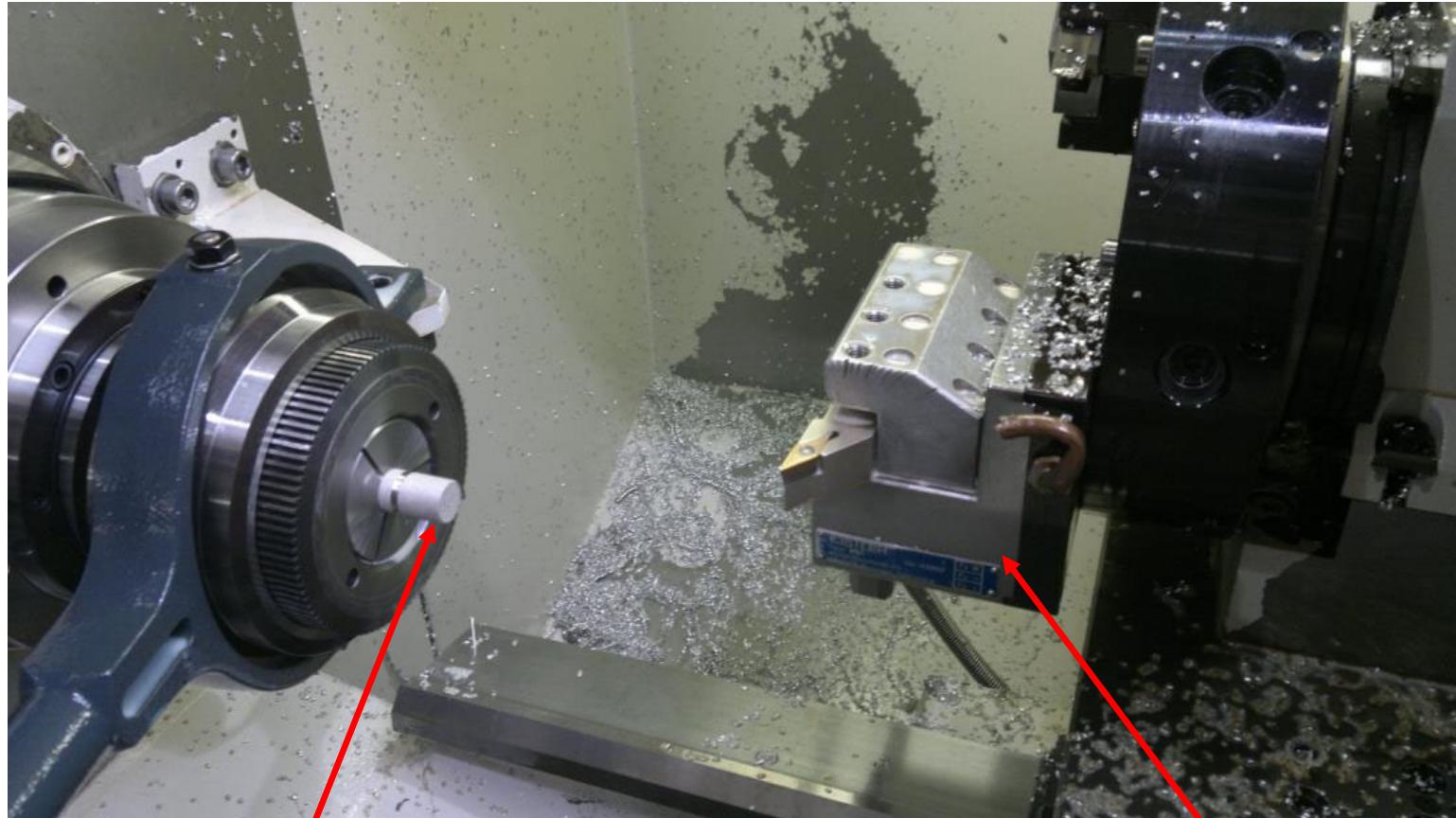
Spanende Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide



- definierte Schneidengeometrie
- vergleichsweise geringe spezifische Schnittkräfte
- kompakte Späne möglich
- enge Formtoleranzen möglich
- i.d.R. maschinengebunden
- hoher Aufwand zur Arbeitsvorbereitung
- hohe Investitionen
- profitabel nur bei hoher Auslastung
- Nur begrenzt einsetzbar bei engen Kavitäten



Zerspanbarkeit Cutting tests 316L turning

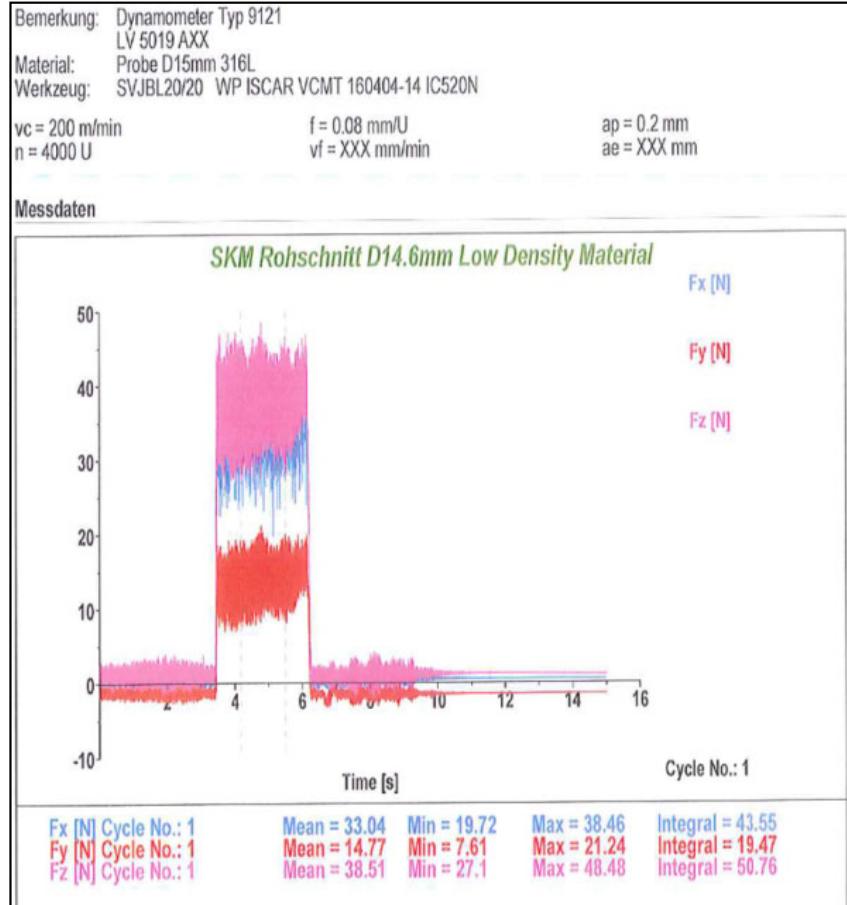


cylindrical work piece \varnothing 15 mm

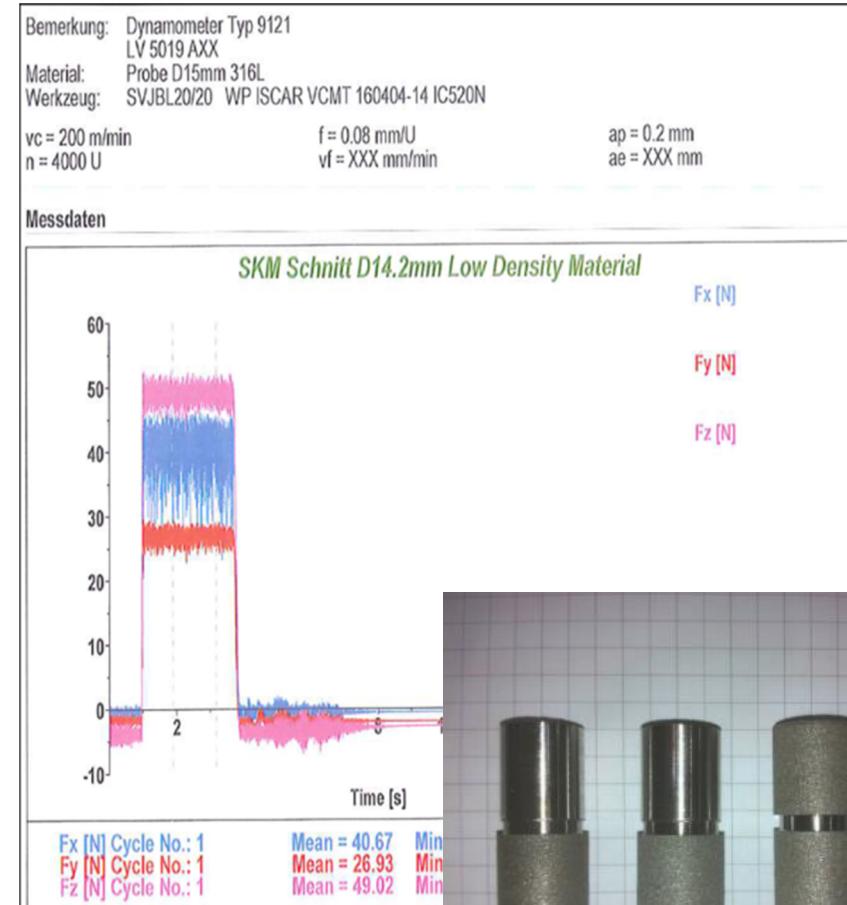
cutting force dynamometer

Zerspanbarkeit Cutting tests 316L turning

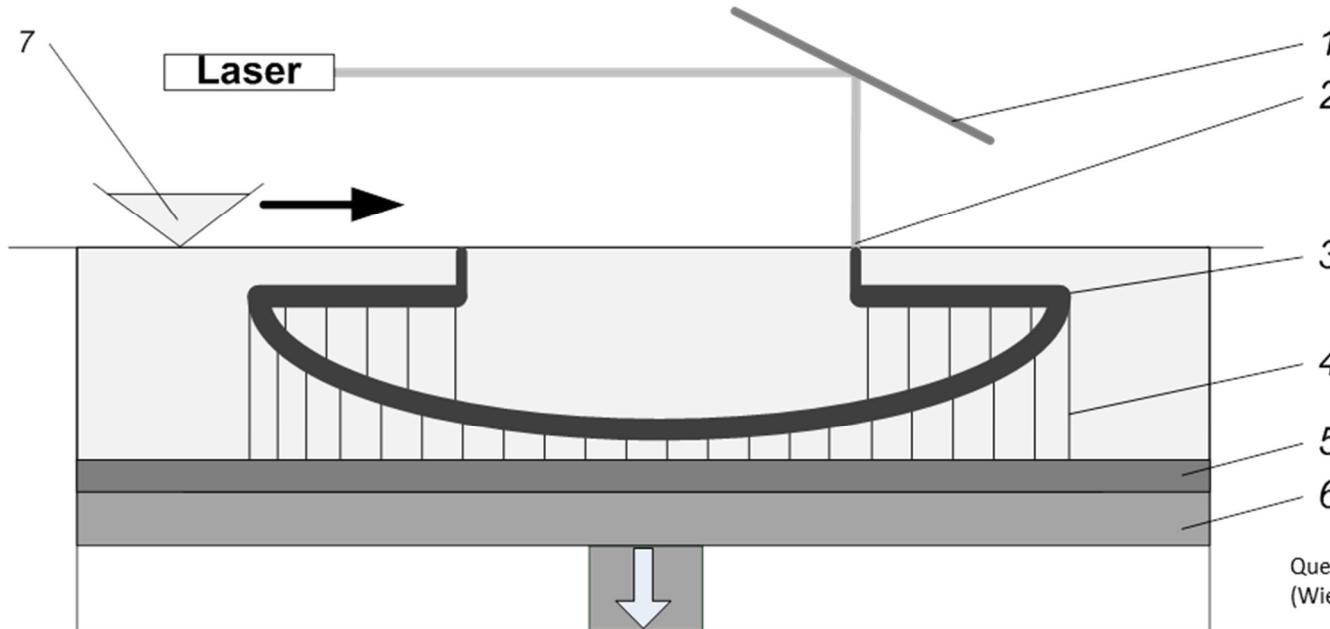
1. Schnitt



2. Schnitt



Nachbehandlungsbedingungen am Beispiel der SLM-Verfahren



Strahlschmelzen (SLM):

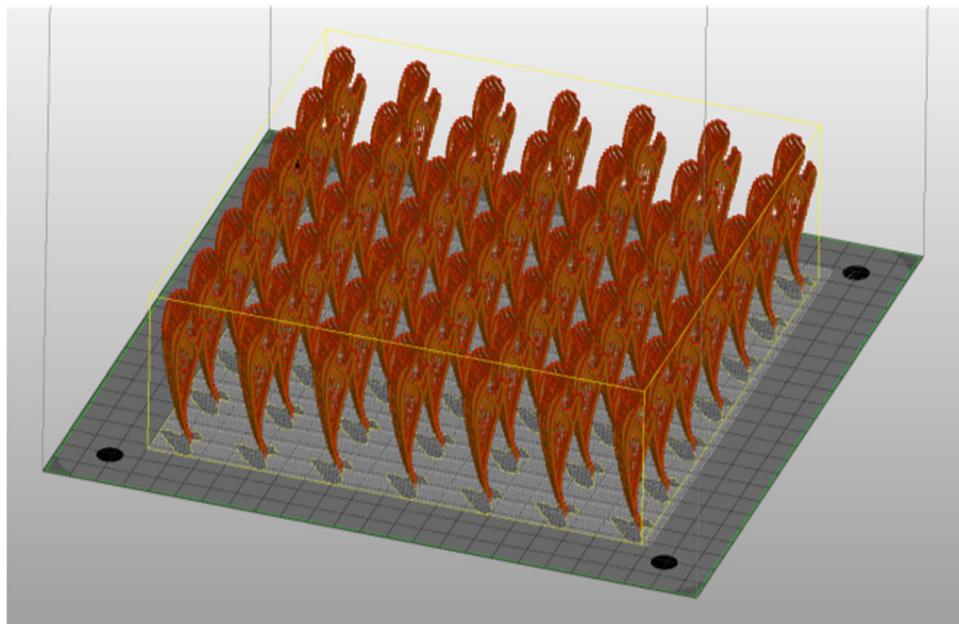
- 1 X-Y Scanner,
- 2 Verfestigungszone,
- 3 generiertes Bauteil,
- 4 Stützkonstruktion,
- 5 Bauplatte,
- 6 Bauplattform mit Hubtisch,
- 7 Beschichter mit Pulvervorrat

Quelle: VDI 3405
(Wiedergegeben mit Erlaubnis des Verein Deutscher Ingenieure e. V.)

Zu lösende Aufgaben:

- Entfernung von Stützstrukturen
- Positionsgenaue Weitergabe auf die Nachbearbeitungsstation

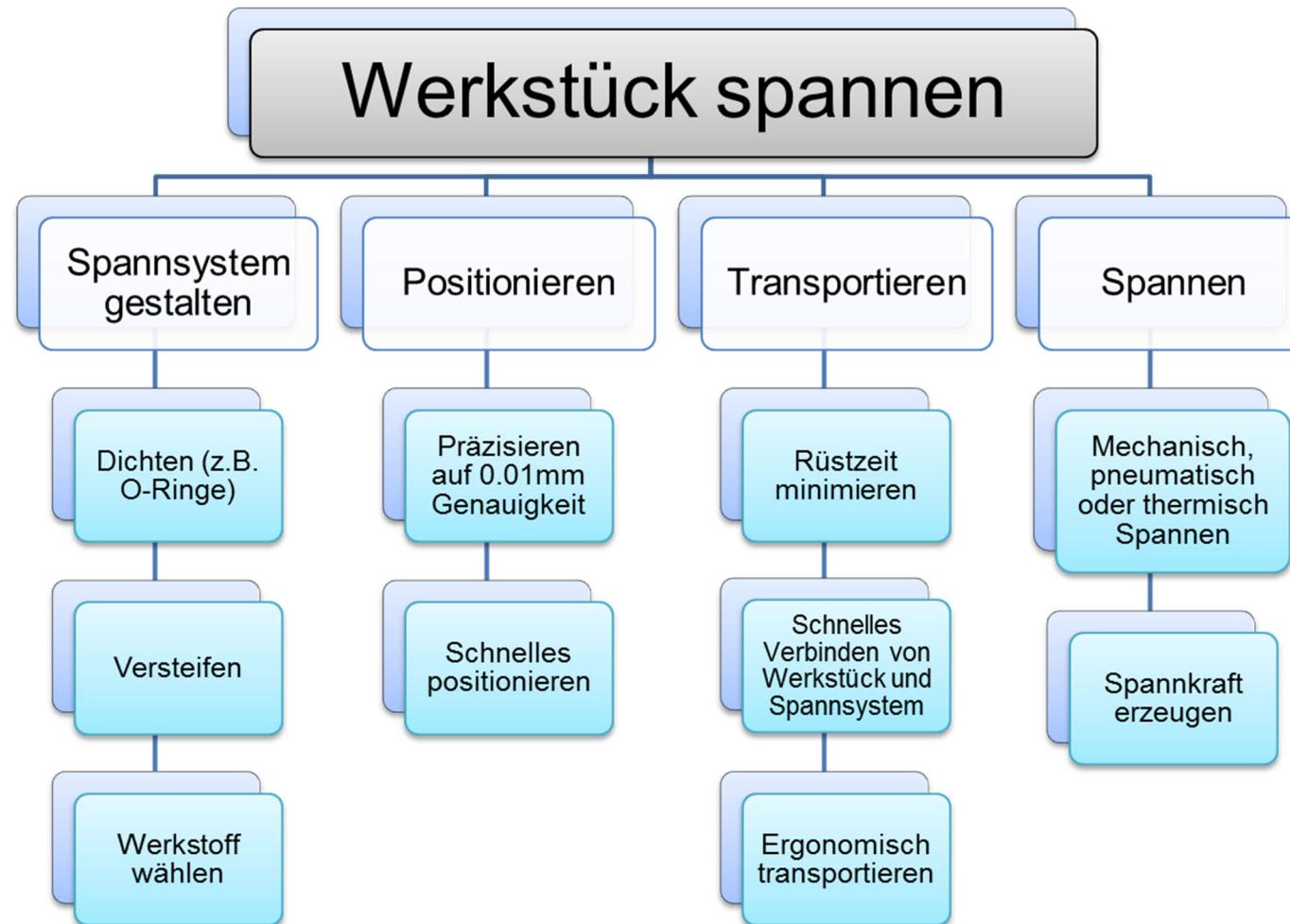
Nachbehandlungsbedingungen beim Mehrfachdruck



Zu lösende Aufgaben:

- Entfernung von Stützstrukturen
- Positionsgenaue Weitergabe
auf die Nachbearbeitungsstation
- Zahlreiche Körperkanten
werden verdeckt, Abtrennen erforderlich
- Durch Abtrennung geht die Position
verloren

Funktionen der Werkstückspannung



Auswirkung von Wärmebehandlung auf die Nachbearbeitung

AM-Verfahren

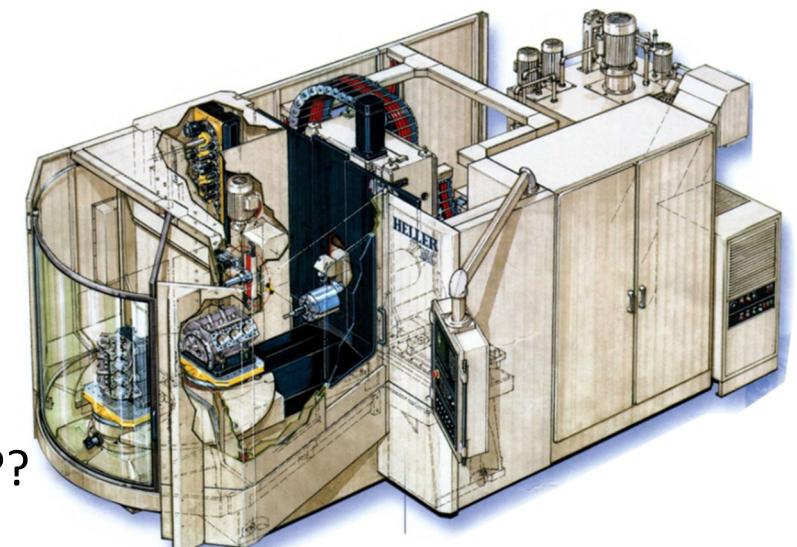


Wärmebehandlung ???



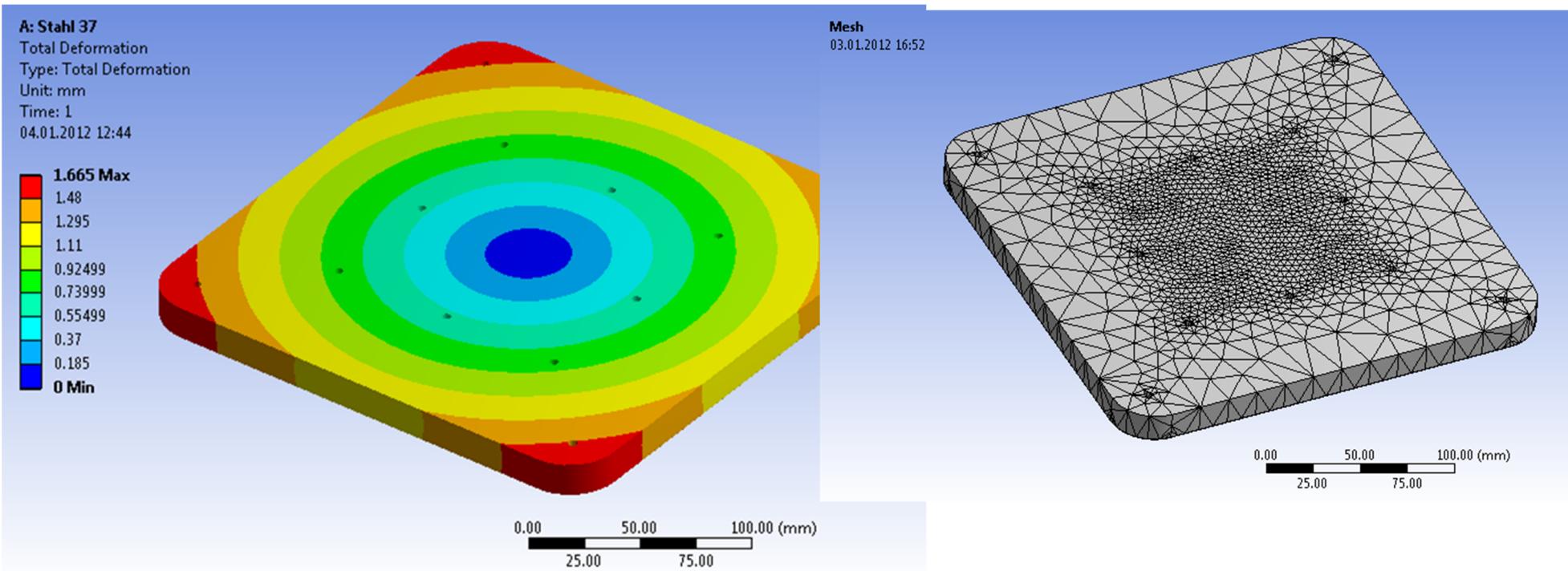
Verlust der Positions-
information des Bauteils ???

Mechanische Nachbearbeitung



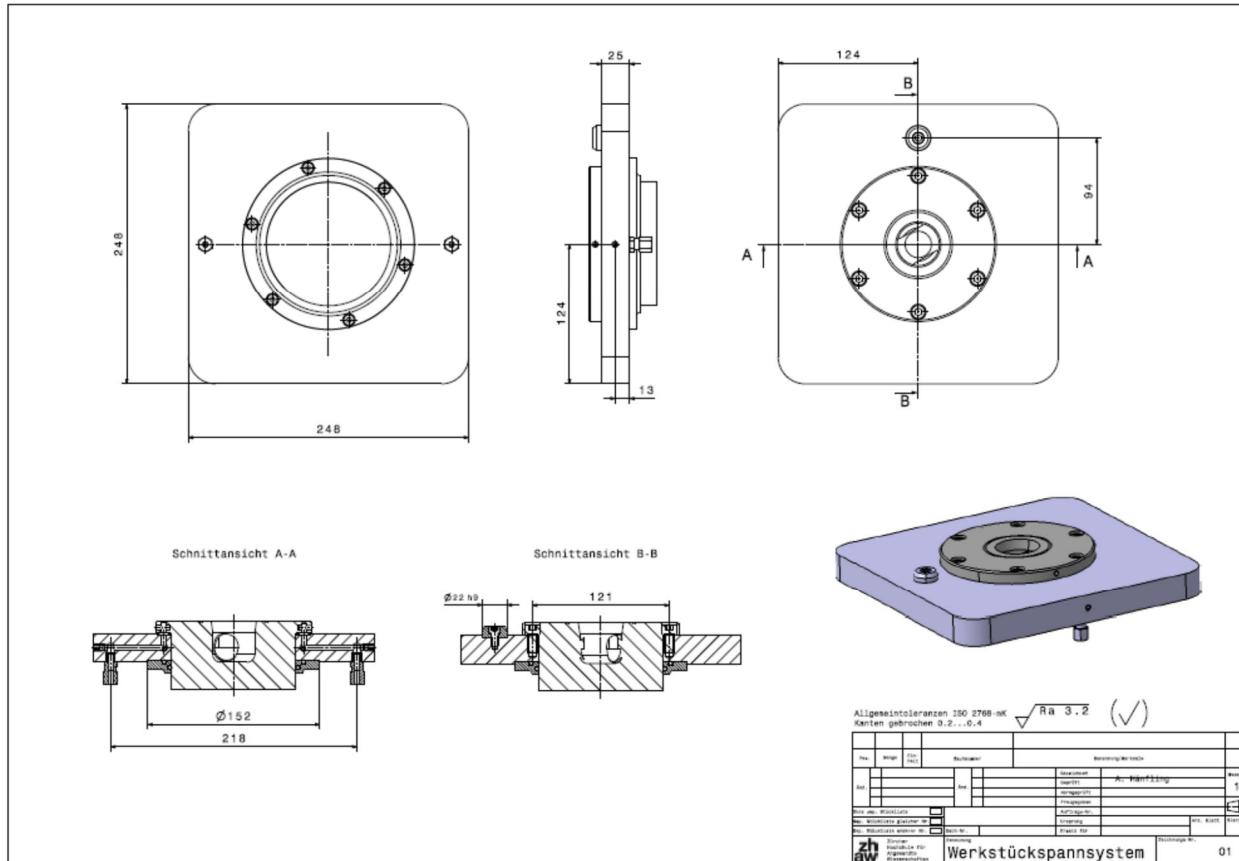
Ist ein Wärmebehandlungsprozess vorgesehen, werden die Rahmenbedingungen zur mechanischen Nachbearbeitung schwieriger

Simulation der Positionsverlagerung auf der Bauplatte

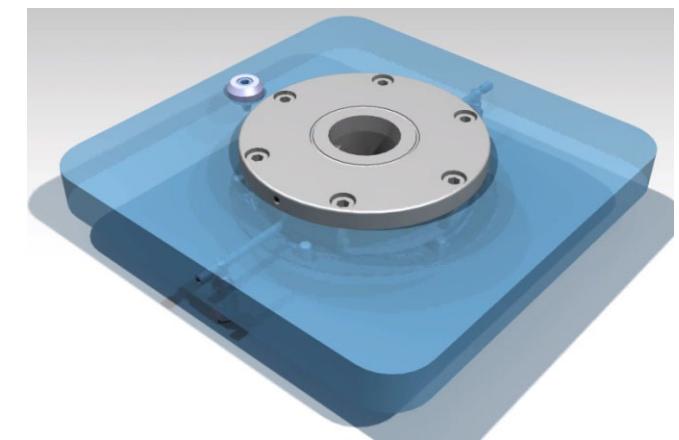


Werkstoff	Max. Totaldeformation [mm]
Stahl 37	1.665
Inconel 718	1.56
FM-Invar	1.56
AM-Invar	1.04
Kovar	0.895

Layout einer wärmebehandlungsgerechten Gestaltung der Bauplatte



- temperaturstabil bis 650°C
- Positionsgenauigkeit ca. 0,01 mm
- Aufgebaut aus marktverfügaren Standardkomponenten



Stützstrukturen und Nachbearbeitung



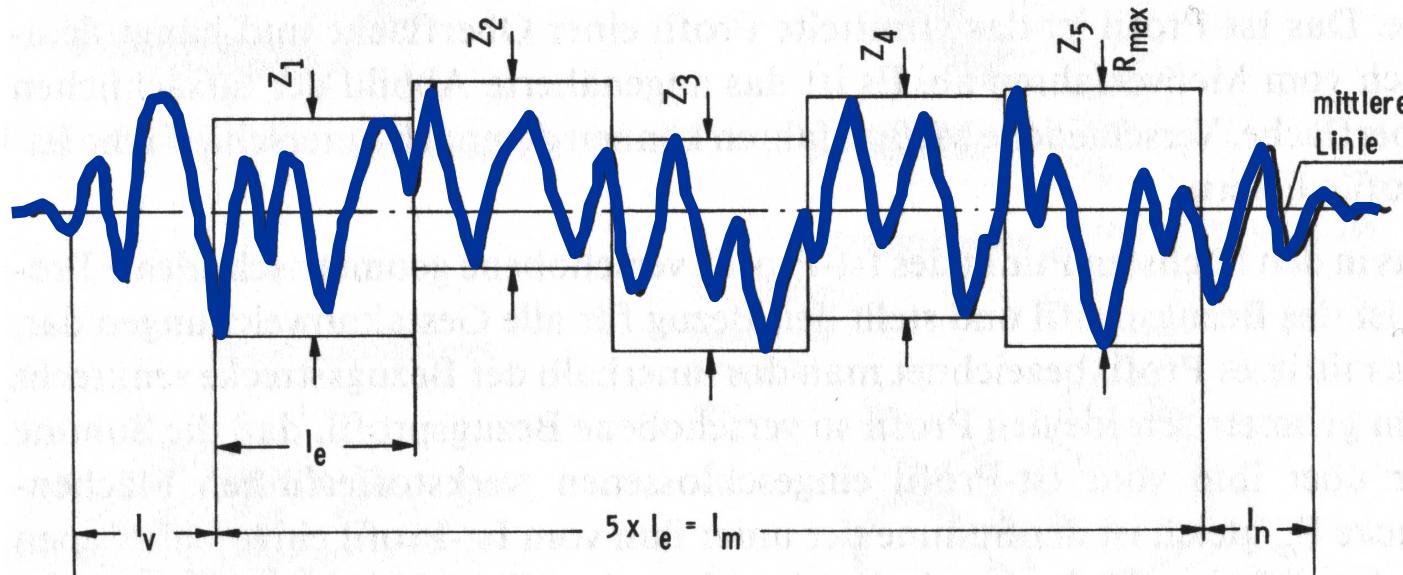
- Gestaltung der Supportstrukturen unter Berücksichtigung der Zerspankräfte
- Wenn möglich, Positionierung ohne Störkonturen
- Möglichst geringe Aufmasse zur Zerspankraftreduzierung

Gestaltabweichungen an technischen Oberflächen

Oberflächen-
qualität

Gestaltabweichung (als Profilschnitt überhöht dargestellt)	Beispiele für die Art der Abweichung	Beispiele für die Entstehungsursache
1. Ordnung: Formabweichungen 	Unebenheit Unrundheit	Fehler in den Führungen der Werkzeugmaschine, Durchbiegung der Maschine oder des Werkstückes, falsche Einspannung des Werkstückes, Härteverzug, Verschleiß
2. Ordnung: Welligkeit 	Wellen	Außermittige Einspannung oder Formfehler eines Fräzers, Schwingungen der Werkzeugmaschine oder des Werkzeuges
3. Ordnung: 	Rillen	Form der Werkzeugschneide, Vorschub oder Zustellung des Werkzeuges
4. Ordnung: 	Rauheit Riefen Schuppen Kuppen	Vorgang der Spanbildung (Reißspan, Scherspan, Aufbauschneide), Werkstoffverformung beim Sandstrahlen, Knospenbildung bei galvanischer Behandlung
5. Ordnung: nicht mehr in einfacher Weise bildlich darstellbar	Gefüge- struktur	Kristallisationsvorgänge, Veränderung der Oberfläche durch chemische Einwirkung (z. B. Beizen), Korrosionsvorgänge
6. Ordnung: nicht mehr in einfacher Weise bildlich darstellbar	Gitteraufbau des Werkstoffes	Physikalische und chemische Vorgänge im Aufbau der Materie, Spannungen und Gleitungen im Kristallgitter
	Überlagerung der Gestaltabweichungen 1. bis 4. Ordnung	

Beurteilung technischer Oberflächen: Rauheit



Mittenrauhwert R_a : arithmetischer Mittelwert der absoluten Beträge der Abstände h_i des Istprofils vom mittleren Profil

$$R_a = \frac{1}{l} \cdot \int_{x=0}^{x=l} |h_i| \cdot dx$$

gemittelte Rauhtiefe R_z :

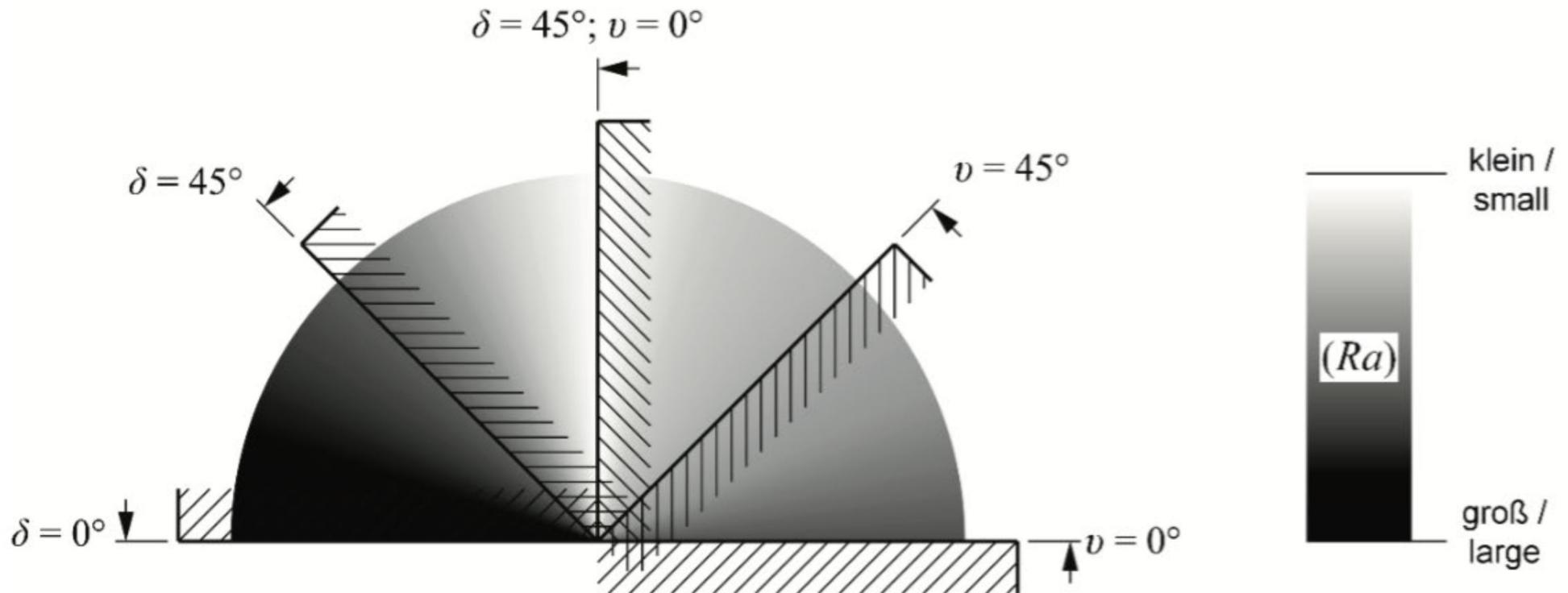
arithmetisches Mittel aus den Einzelrauhtiefen fünf aneinander grenzender Meßstrecken

$$R_z = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 z_i$$

maximale Rauhtiefe:

Größte der auf der Gesamtmeßstrecke vorkommenden Einzelrauhtiefen

Abhängigkeit der Rauheit von der Bearbeitungsposition beim SLM

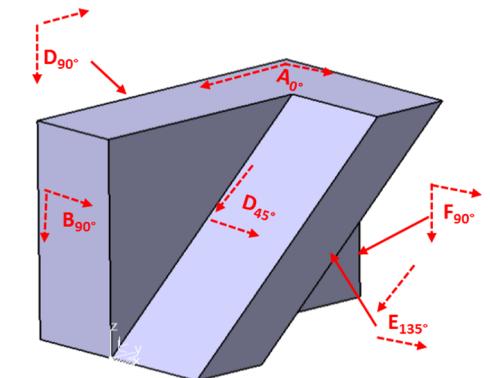


nach VDI 3405 Blatt 3

Eigenschaften nach der additiven Fertigung

Nachbehandlung: Strahlen / Beschichten / Elektropolieren

- Einfluss verschiedener Oberflächenbehandlungen auf die Rauigkeit abhängig von der Orientierung der jeweiligen Fläche im Bauraum
- Material: 1.4404



unbehandelt

$R_{a,0^\circ} \approx 6 \mu\text{m}$
 $R_{a,90^\circ} \approx 12 \mu\text{m}$
 $R_{a,45^\circ} \approx 13 \mu\text{m}$
 $R_{a,135^\circ} \approx 15 \mu\text{m}$

sandgestrahlt

$R_{a,0^\circ} \approx 3 \mu\text{m}$
 $R_{a,90^\circ} \approx 4 \mu\text{m}$
 $R_{a,45^\circ} \approx 4 \mu\text{m}$
 $R_{a,135^\circ} \approx 7 \mu\text{m}$

elektropoliert

$R_{a,0^\circ} \approx 5 \mu\text{m}$
 $R_{a,90^\circ} \approx 7 \mu\text{m}$
 $R_{a,45^\circ} \approx 6 \mu\text{m}$
 $R_{a,135^\circ} \approx 14 \mu\text{m}$

trowalisiert

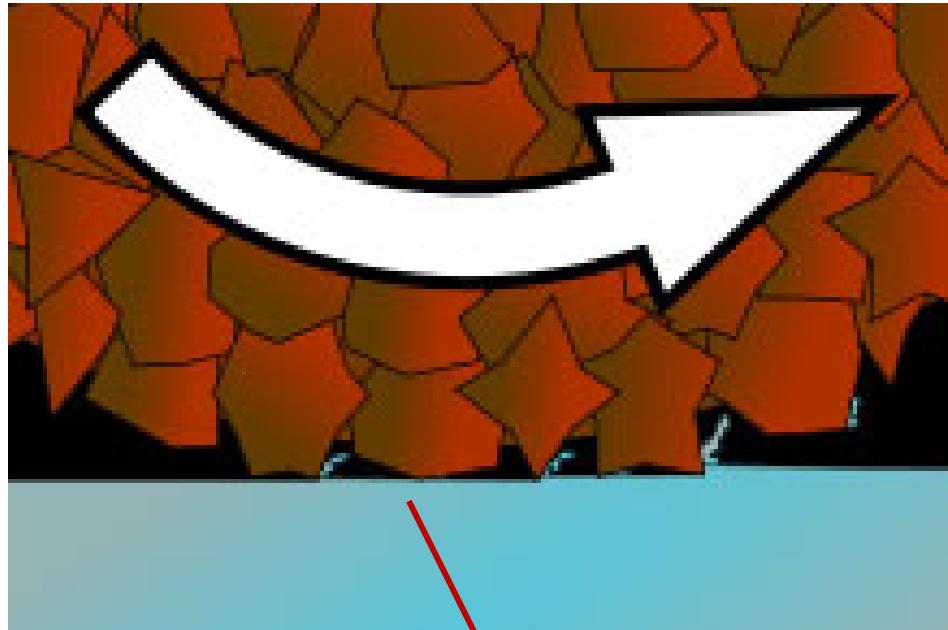
$R_{a,0^\circ} \approx 3 \mu\text{m}$
 $R_{a,90^\circ} \approx 4 \mu\text{m}$
 $R_{a,45^\circ} \approx 7 \mu\text{m}$
 $R_{a,135^\circ} \approx 10 \mu\text{m}$

verchromt
(sandgestrahlt)

$R_{a,0^\circ} \approx 3 \mu\text{m}$
 $R_{a,90^\circ} \approx 3 \mu\text{m}$
 $R_{a,45^\circ} \approx 4 \mu\text{m}$
 $R_{a,135^\circ} \approx 5 \mu\text{m}$

Nachbearbeitungsverfahren

Spanende Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide



- sehr hohe spezifische Kräfte
- kleinste Späne (Staub)
- formflexible Werkzeuge möglich

- Schneidelemente mit unregelmässiger Kontur
- überwiegend äusserst stumpfe Geometrie

Schleifen

CNC-gesteuerte stationäre Schleifmaschinen

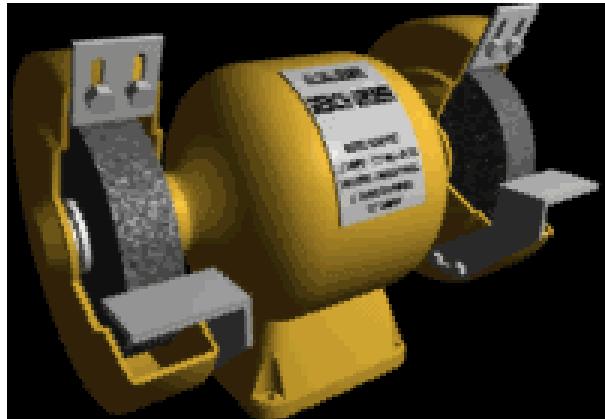


- Schleifen von definierten Konturen möglich
- Formtoleranzen im Bereich 0,01 mm
- Absaugen des Schleifstaubs möglich
- überwiegend eingesetzt für Metalle
- hoher Auswand für Arbeitsvorbereitung
- Hohe Investitionskosten
- Profitabel nur bei hoher Auslastung

Quelle: Walter AG

Schleifen

Schleifstationen und manuelles Schleifen



- Freihandbewegungen von Werkzeug oder Werkstück
- definierte Konturen kaum erreichbar
- wenig Aufwand zur Arbeitsvorbereitung
- geringe Investitionskosten
- auch bei geringer Auslastung sinnvoll



Polieren

Polieren von FDM-Bauteilen



- Reduktion der Rifenstruktur
- Sehr geringe Veränderung der Absolutmasse
- Kurze Prozesszeiten möglich
- Polieren von engen Kavitäten schwierig



Quelle: Stratasys

Polieren

Manuelles Polieren

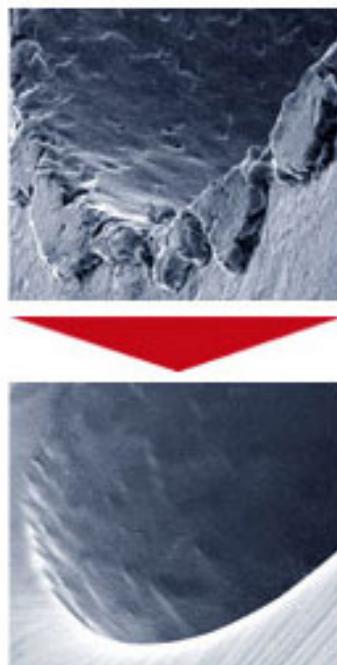


- sehr hohe Oberflächengüte möglich
- definierte Konturen kaum erreichbar
- wenig Aufwand zur Arbeitsvorbereitung
- geringe Investitionen
- sehr zeit-/kostenintensiv

Quelle: Stratasys

Polieren

Fliesspolieren

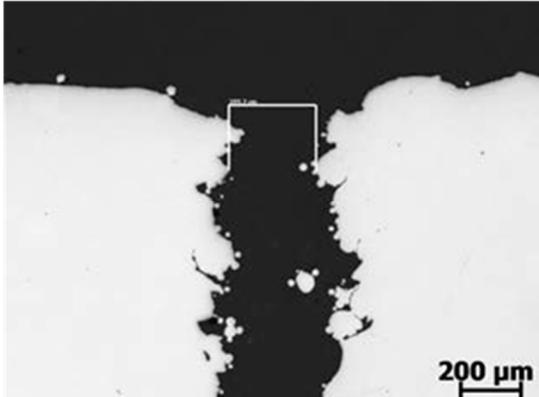
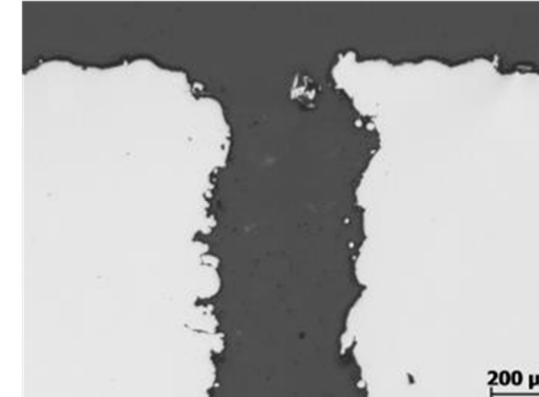
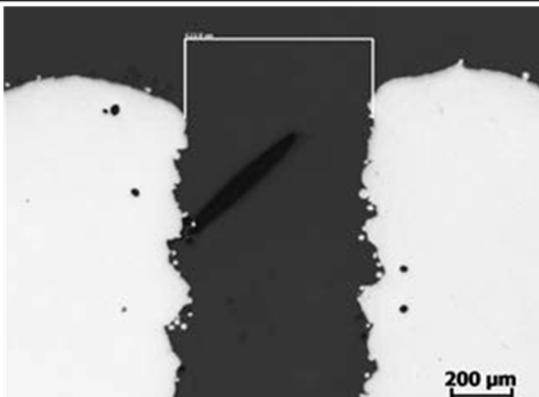


Quelle: Micro Surfaces

- Poliergut wird mittels Trägerflüssigkeit /-paste verwendet
- geeignet für:
 - tiefe Kavitäten
 - Hinterschneidungen
 - kleine Bohrungen
- Poliergut variabel
- lange Prozesszeiten
- Prozess muss auf jede Anwendung eingestellt werden

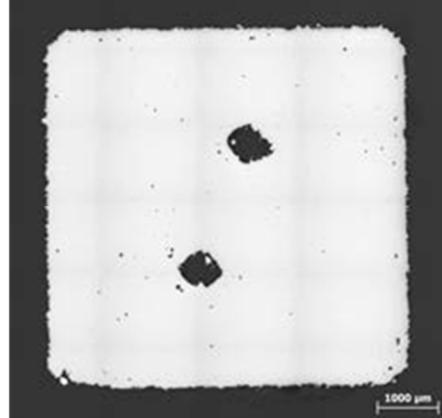
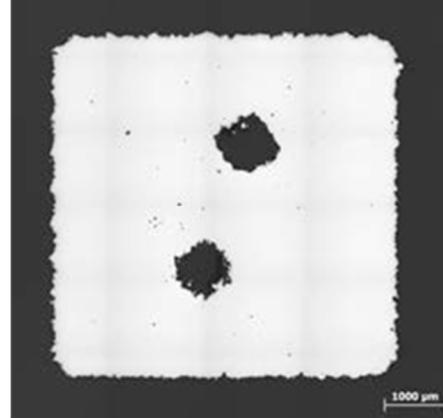
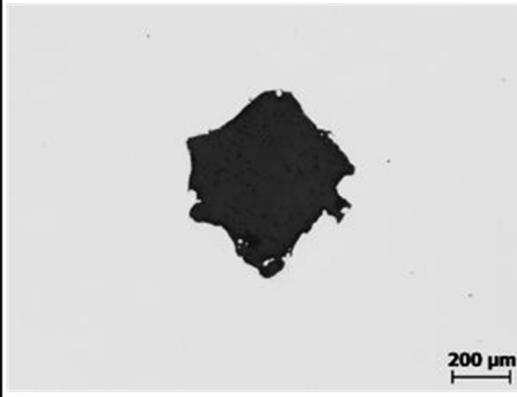
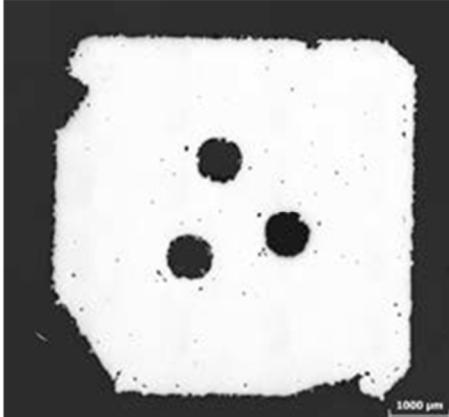
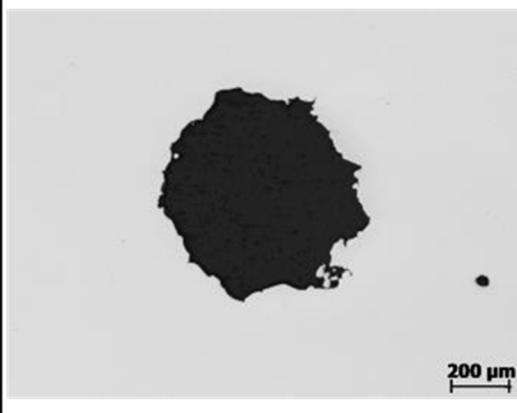
Beispiele für Polierergebnisse (1)

Schliffbilder Längsschnitt

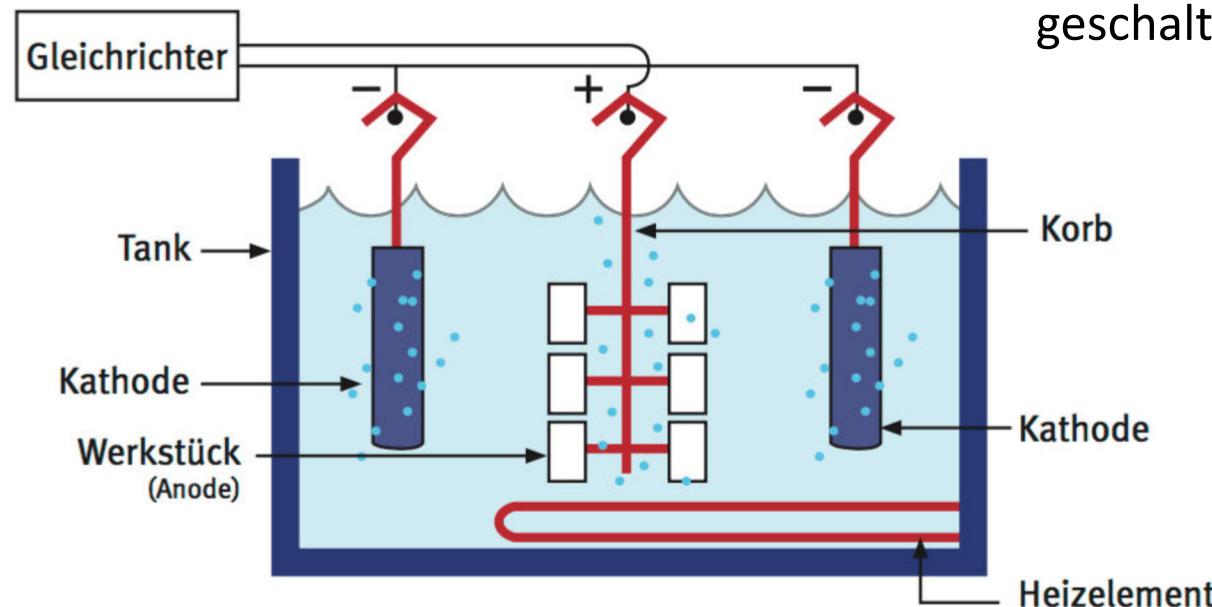
	Ohne Kontur, unpoliert	Ohne Kontur, poliert
Eckig (einteilig)		
Rund (zweiteilig)		

Beispiele für Polierergebnisse

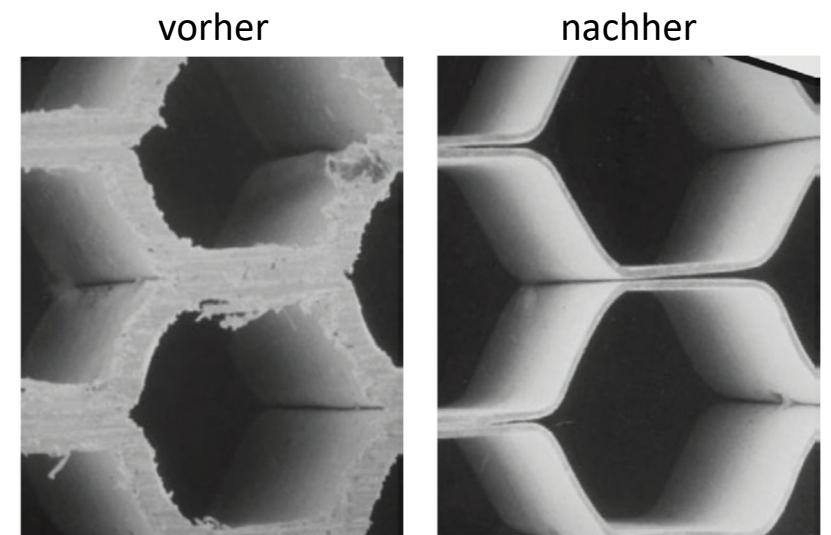
Schliffbilder von Querschnitt

	Mit Kontur	Ohne Kontur	Ohne Kontur, poliert
Eckig (einteilig)			
Rund (zweiteilig)			

Elektropolieren



Der Materialabtrag erfolgt durch die Bewegung von Werkstück-Ionen vom anodisch geschalteten Bauteil zur Kathode



Trovalisieren



Quelle: Pipe

- Brechen der Rauheitsspitzen
- sehr geringe Veränderung der Absolutmasse
- Gleichmässiges Schleifbild durch sehr hohe Anzahl von Werkzeug-/Werkstückkontakte
- lange Prozesszeiten
- teils starke Verrundung von Kanten



Quelle: Rime

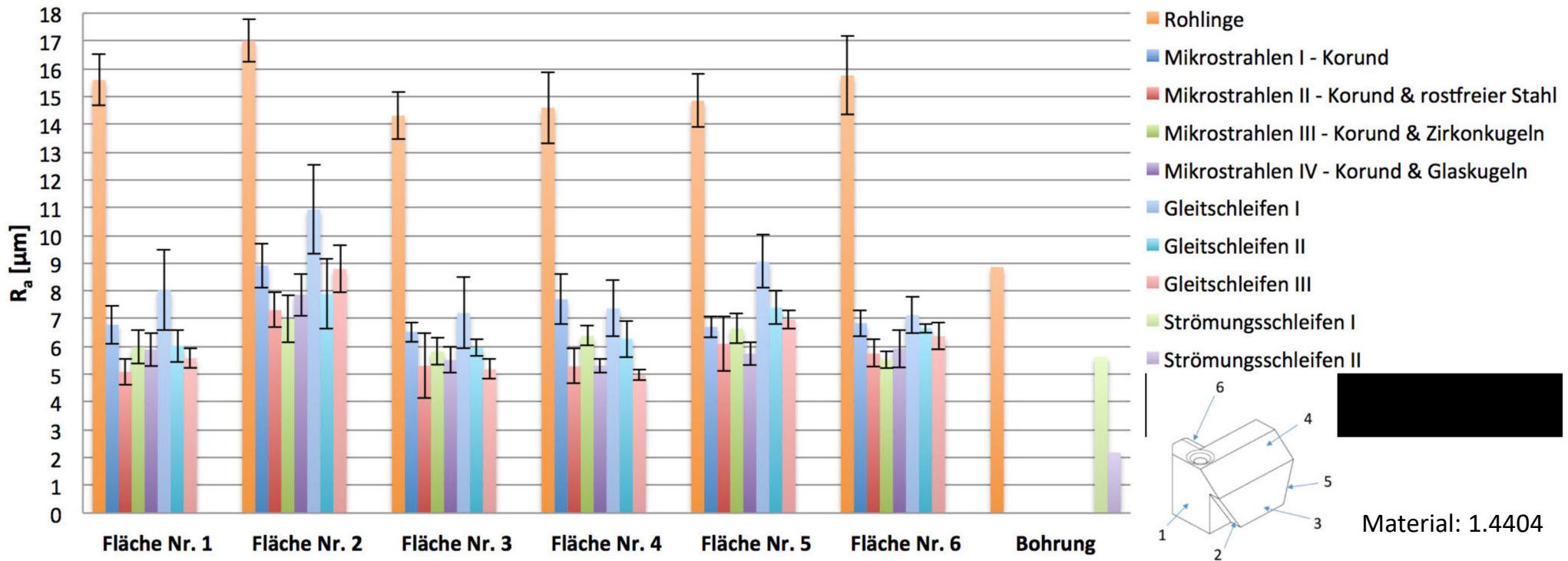
Sandstrahlen

Manuelles Sandstrahlen



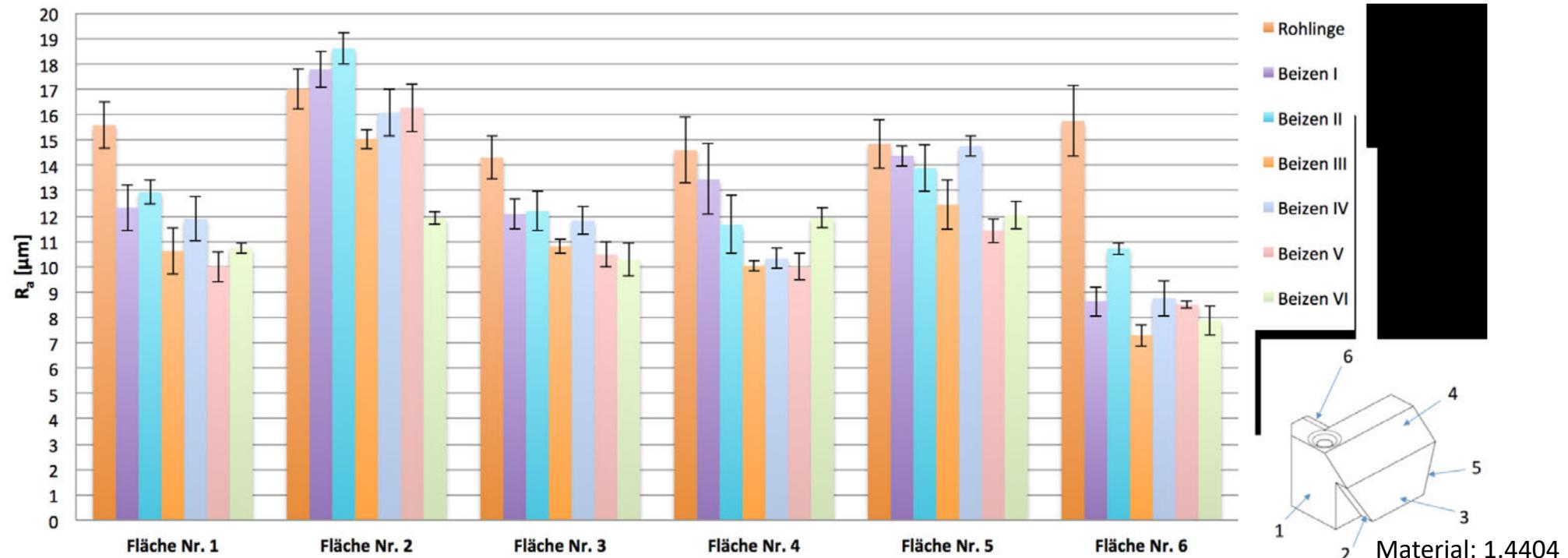
- Brechen der Rauheitsspitzen
- sehr geringe Veränderung der Absolutmasse
- Teils starke Verrundung von Kanten
- vielfältiges Strahlgut
- Ergebnis teils ungleichmäßig aufgrund unterschiedlicher Wirkdauer
- Hoher manueller Aufwand
- enge Strukturen kaum erreichbar

Bearbeitungsergebnisse von Strahlverfahren auf die Rauhtiefe



- signifikante Verbesserung der Oberflächenqualität
- Bearbeitungsergebnis für viele technische Anwendungen nicht ausreichend

Bearbeitungsergebnisse von Beizverfahren auf die Rauhtiefe



- keine wesentliche Verbesserung der Oberflächenqualität
- Bearbeitungsverfahren in dieser Form nicht sinnvoll

Stoffeigenschaften verändern

Infiltrieren von AM-Bauteilen

Bei der Infiltration wird die Oberfläche eines gedruckten Objektes mit Epoxidharz behandelt.

Die Infiltration geschieht durch Unterdruck,
Das Harz wird mit Hilfe eines Pinsels
oder einer Folie aufgebracht.



- Verfestigung der Oberfläche
- keine Beeinflussung der Grundmatrix
- komplexe Geometrien möglich
- Verbesserung der Oberflächenqualität
- hoher manueller Aufwand
- bevorzugt eingesetzt bei wenig eigenstabilen AM-Bauteilen (z.B. Gips)



Stoffeigenschaften verändern

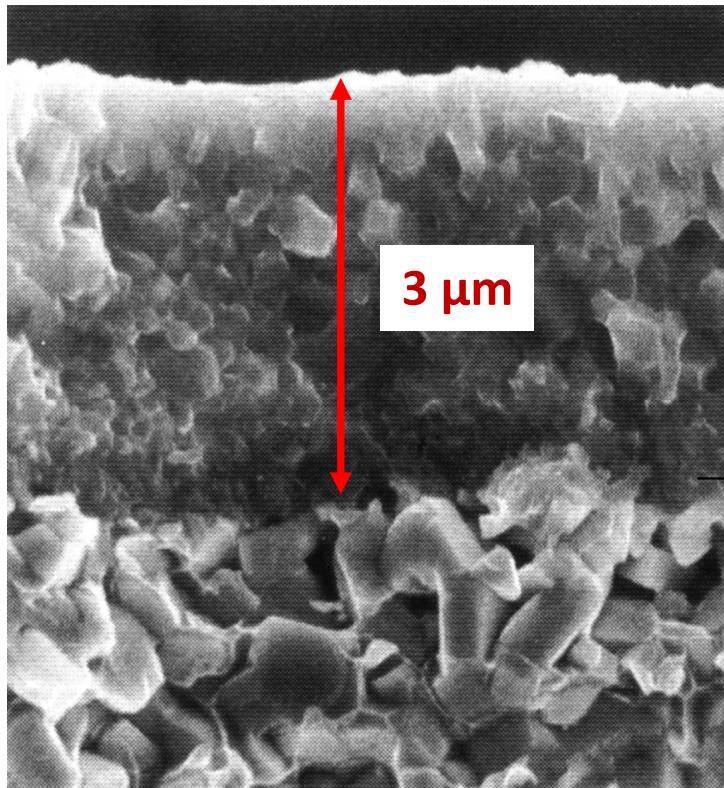
Galvanisieren

Bei der Galvanisierung werden metallische Oberflächenfilme auf das 3D-Bauteil aufgebracht.
Das Aufbringen geschieht in Tauchbädern.

- Verbesserung der Festigkeit
- Verbesserung der Oberflächenqualität
- Dekorative Effekte
- Hoher Vorbereitungsaufwand
 - Schleifen
 - Versiegeln der Oberfläche, damit keine galvanischen Lösungen absorbiert werden



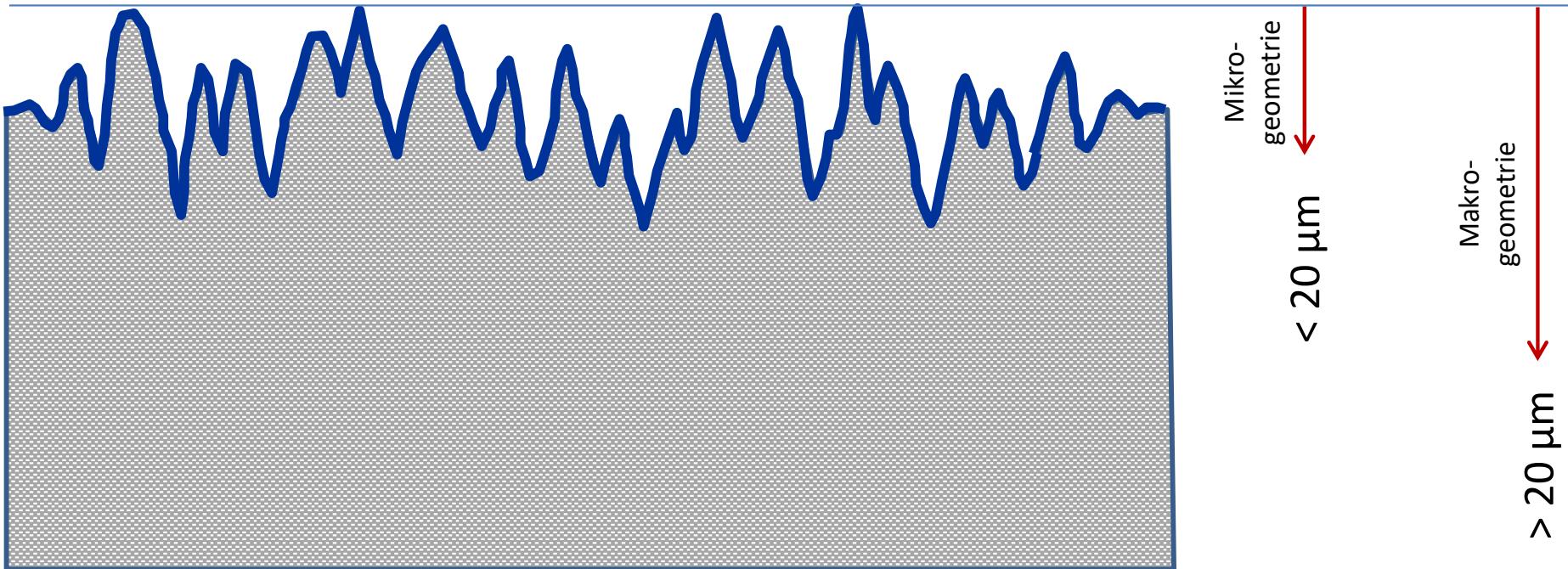
PVD-Hartstoffschichten als Beispiel für Rahmenbedingungen beim Beschichten



PVD-Hartstoffschicht
auf Hartmetallsubstrat

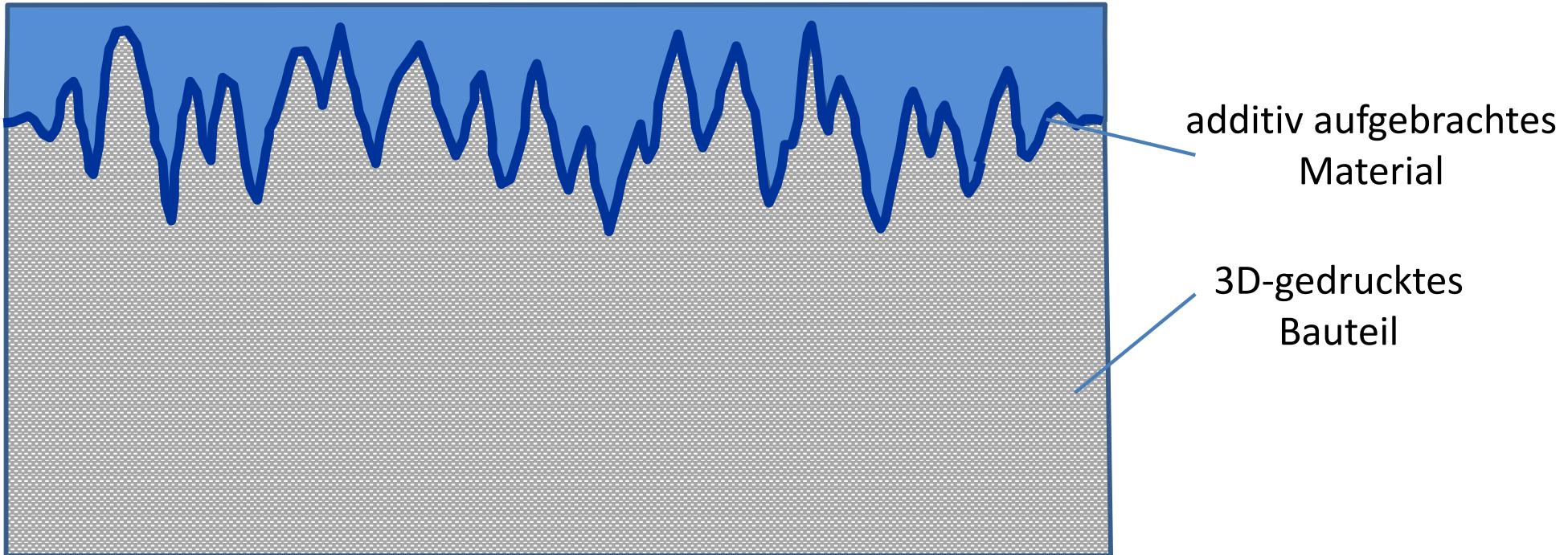
- Beschichtungen benötigen i.d.R sehr gut präparierte Substrate
- Die heute erreichbare Oberflächenqualität beim AM reicht bei weitem nicht aus
- Eine mechanische Nachbehandlung zur Vorbereitung der Beschichtung ist vor allem bei sehr dünnen Schichten notwendig

Wirktiefen verschiedener Nachbearbeitungsverfahren



- mikrogeometrische Effekte können gut mit Strahlen oder Polieren erreicht werden
- mit zunehmender Effekttiefe nimmt die Bearbeitungszeit exponentiell zu
- mit Strahlen oder Polieren können keine (kaum) makrogeometrischen Effekte erreicht werden (Anstreben konkreter Toleranzen)
- für toleranzgerechte Bauteile werden Verfahren mit festem Werkzeugkörper benötigt (Drehen, Fräsen, Schleifen...)

Additives Nachbearbeiten



- Infiltrieren und Beschichten kann als additives Nachbearbeiten verstanden werden
- die Oberfläche bildet in Abhängigkeit von der Schichtdicke die Substrattopografie mehr oder weniger deutlich ab
- die Oberflächeneigenschaften sind massgeblich durch das Schichtmaterial bedingt
- makroskopische Abweichungen von der Sollkontur können nicht/kau ausgeglichen werden