

SLM Fertigung von Brennkammer- Kühlungsstrukturen aus Inconel 718

G. Kasperovich, P. Barriobero-Vila, G. Requena, J. Haubrich

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

Institut für Werkstoff-Forschung

Metallische Strukturen und
hybride Werkstoffsysteme



Galina.Kasperovich@dlr.de

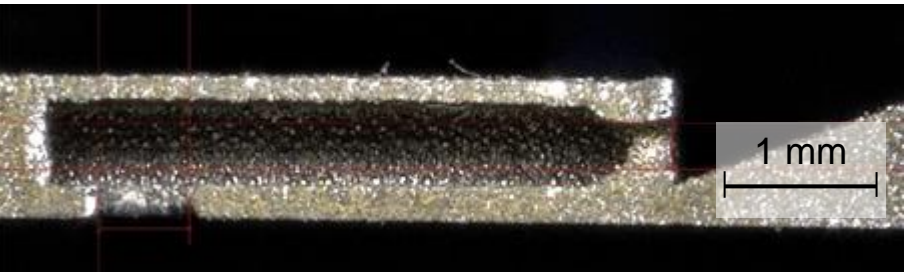
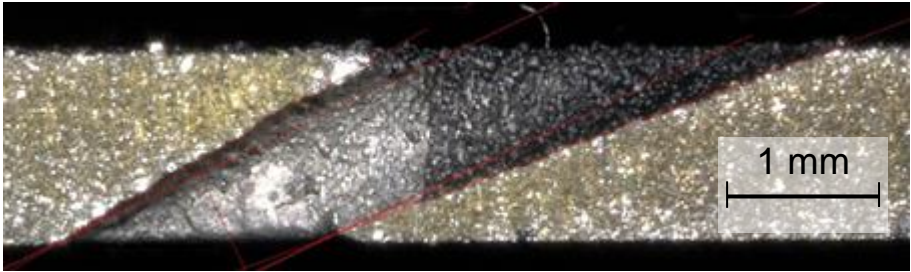
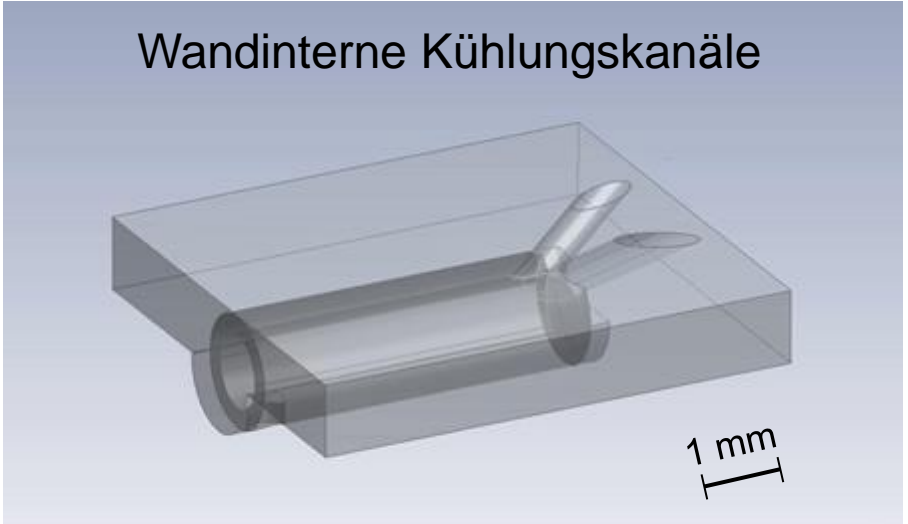
Wissen für Morgen



Brennkammer mittels SLM: Projekt SkaMa

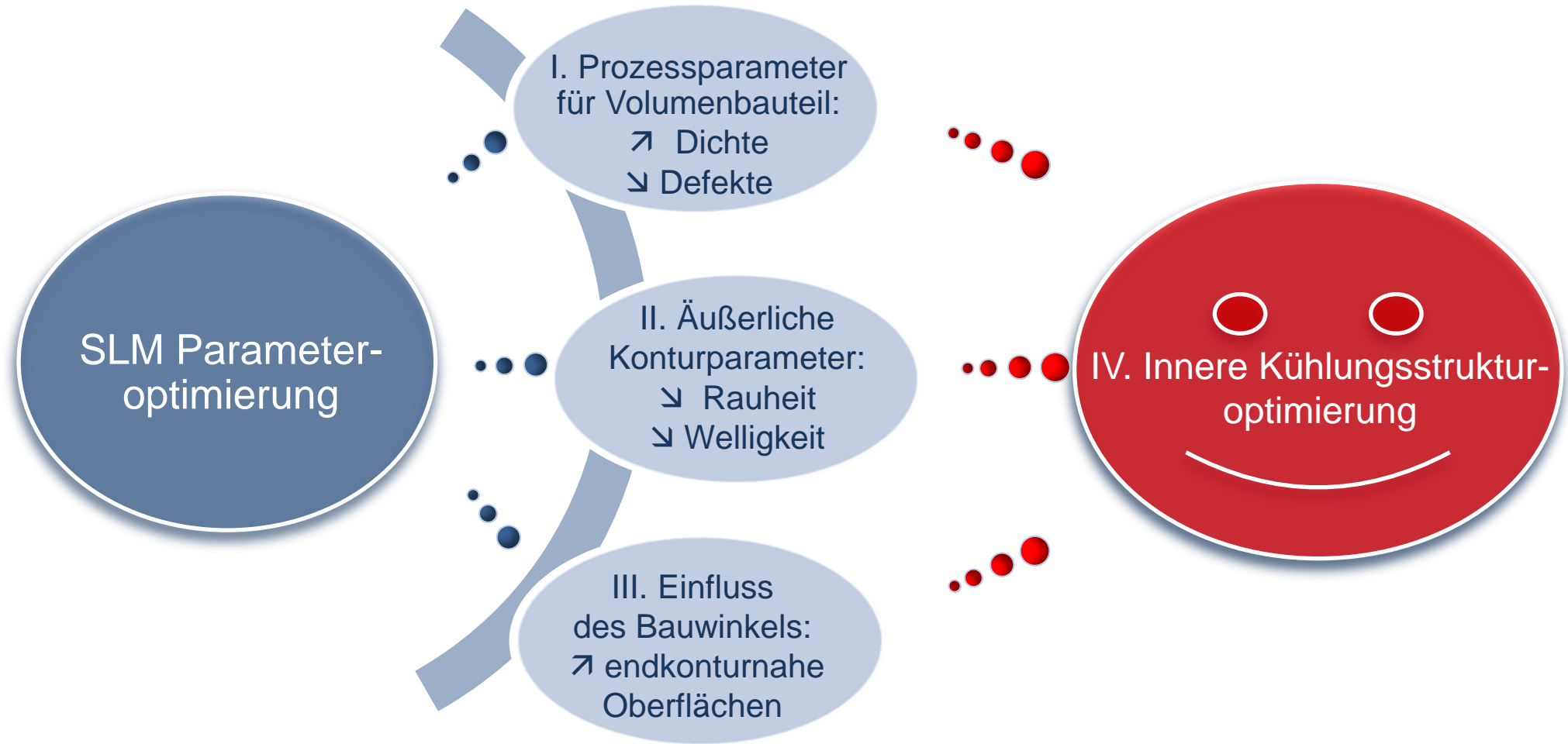
Selektives Laserschmelzen (SLM)

Inconel 718



25 & 45°

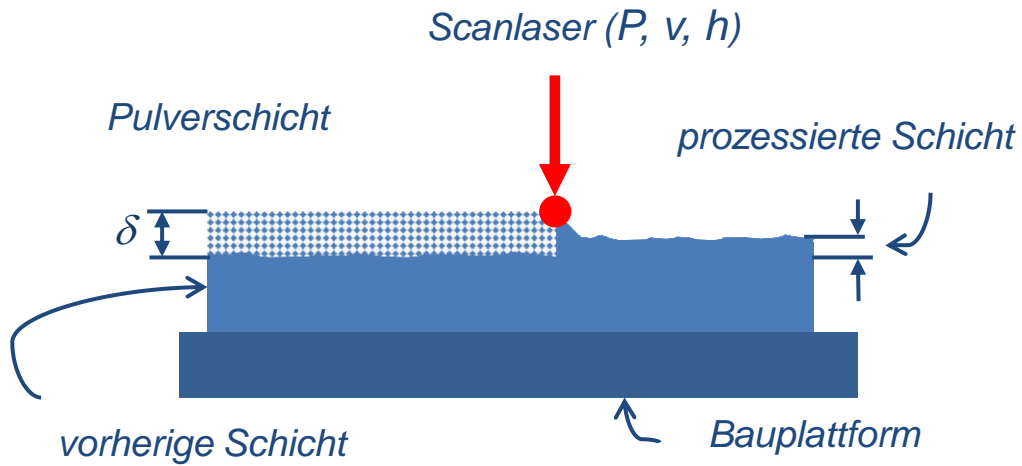
0° & 22.5°



I. Optimierung der Prozessparameter



SLM Prozessparameter



$$E_V = \frac{P}{v \cdot \delta \cdot h} \text{ , [J/mm}^3\text{]}$$

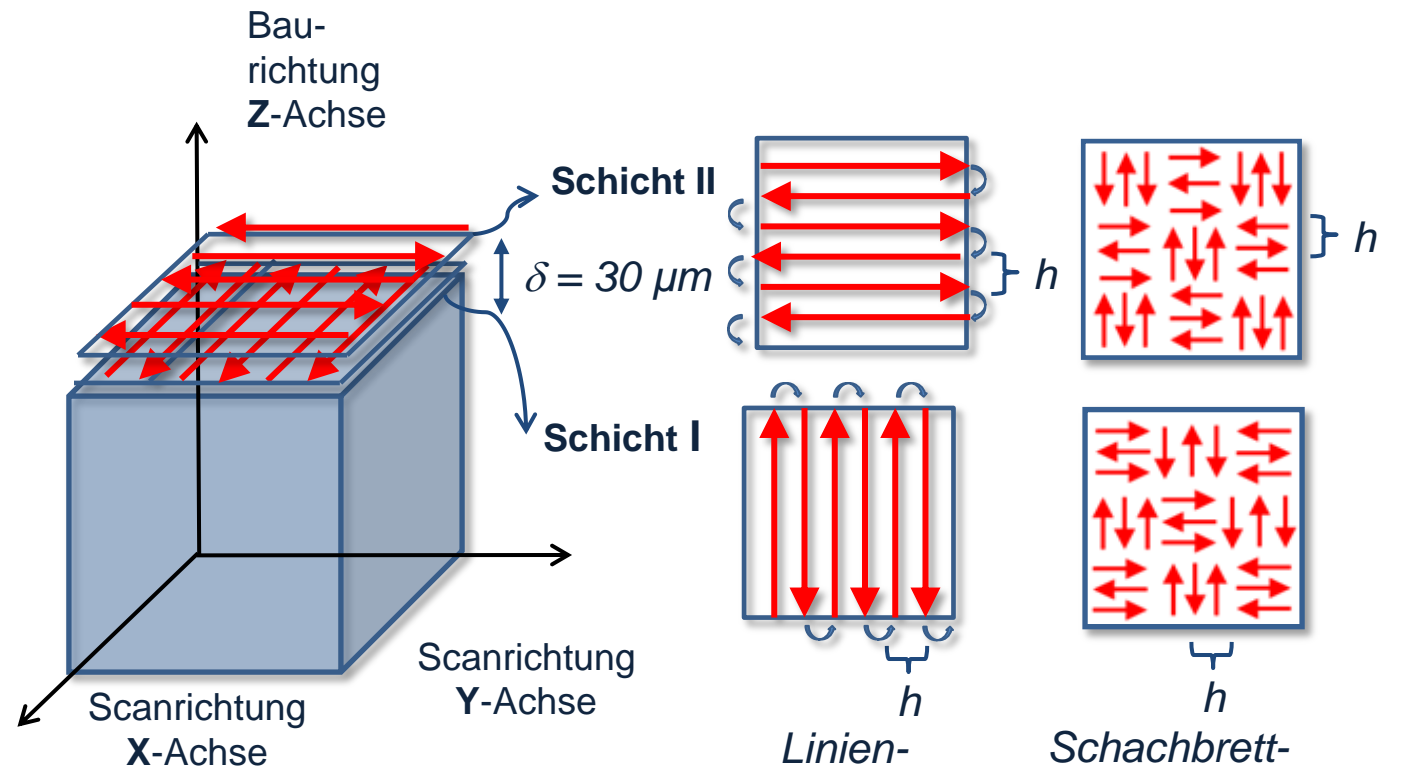
wo:

P - Leistung, W

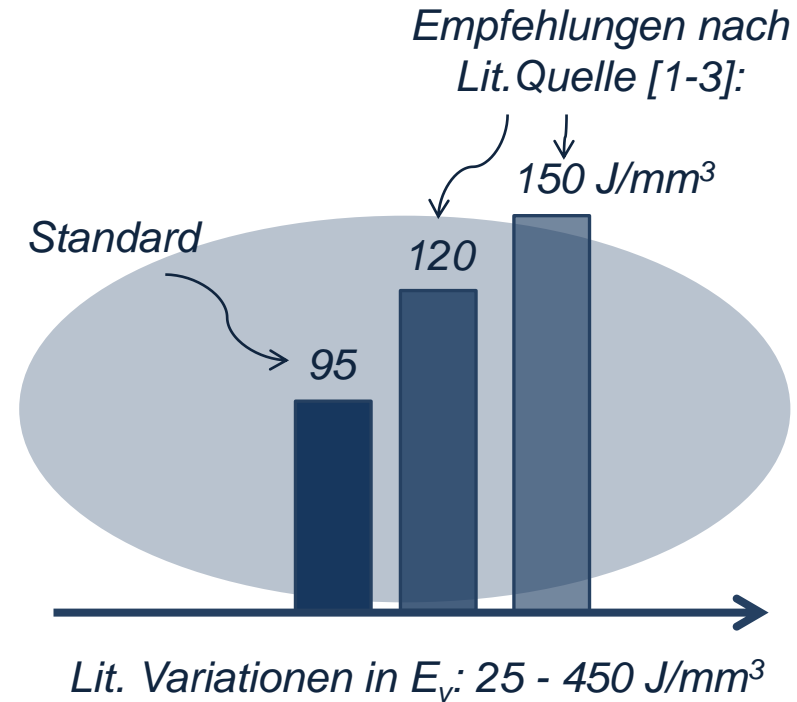
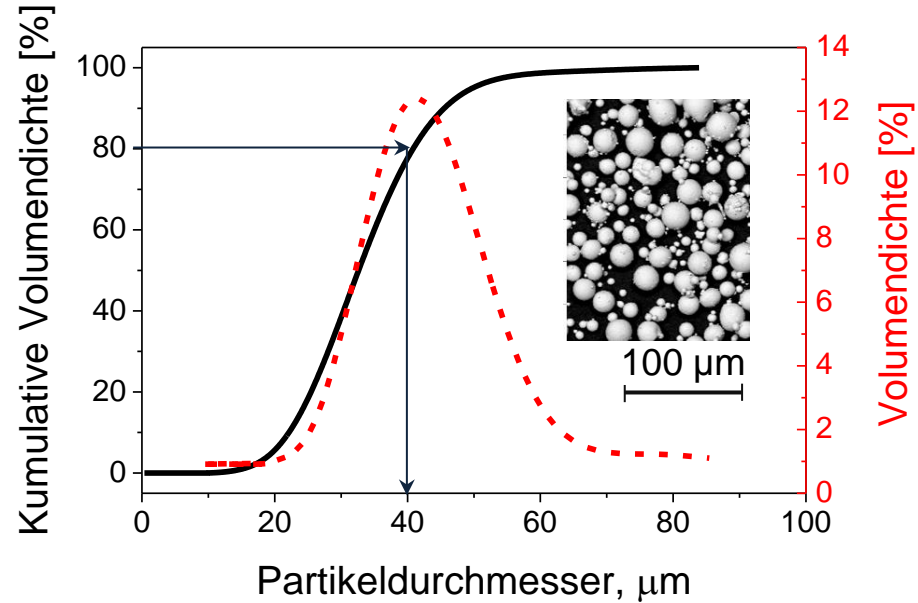
v - Geschwindigkeit, mm/s

δ - Schichtdicke, mm

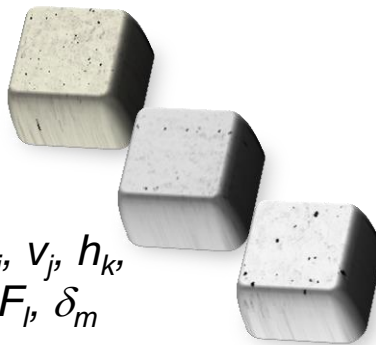
h - Spurversatz, mm



Pulver Inconel 718 & Testprogramm



ConceptLaser
LaserCUSING® M2

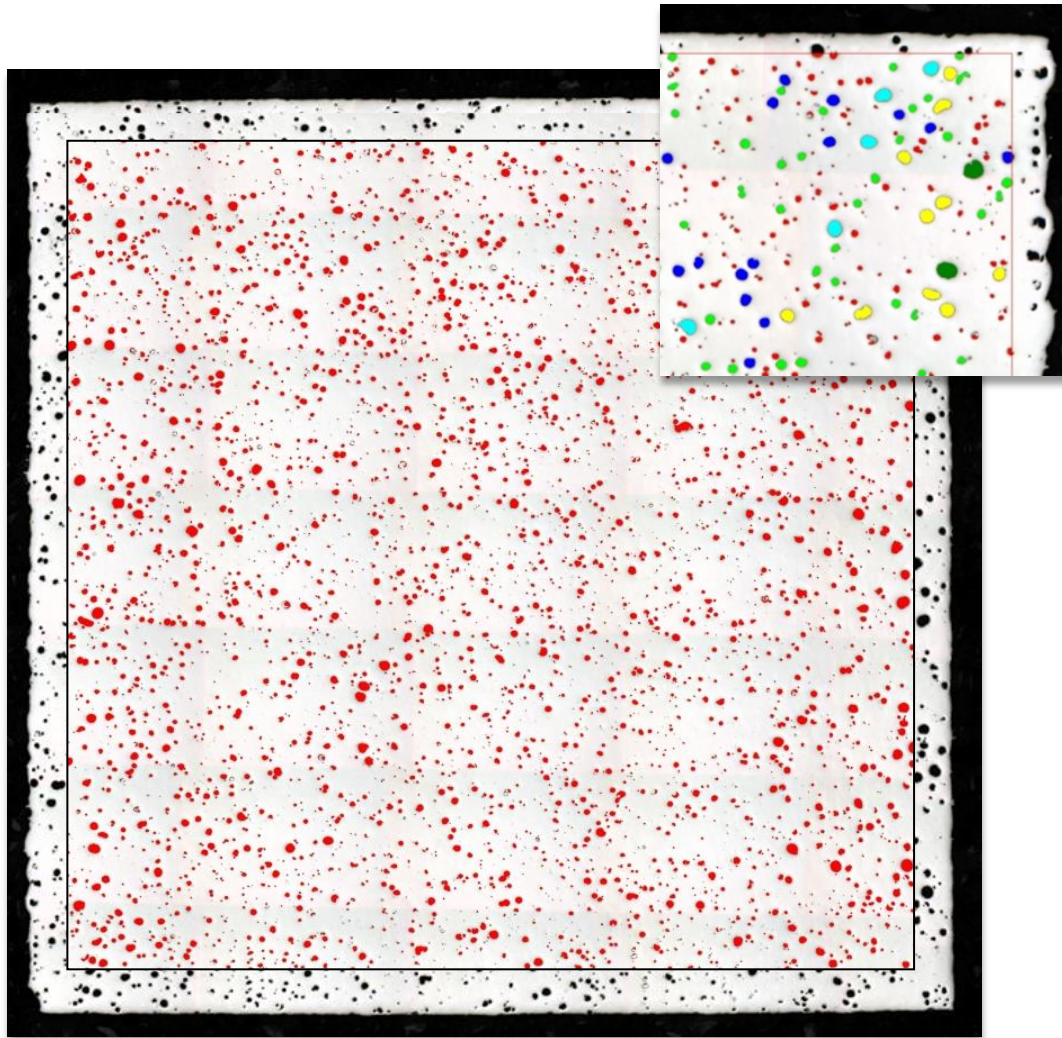


$$P_j, v_j, h_k, F_j, \delta_m$$

$$E_v = 30 - 300 \text{ J/mm}^3$$

- [1] Chlebus E. et al, Mat. Sci & Eng. A639 (2015) 647–655
- [2] Jia Q. and Gu D., J. of Alloys and Compounds 585 (2014) 713–721
- [3] Bauer T., Int.Symp SFF (2015) 813-822

2D Mikrostrukturanalyse mittels LSM

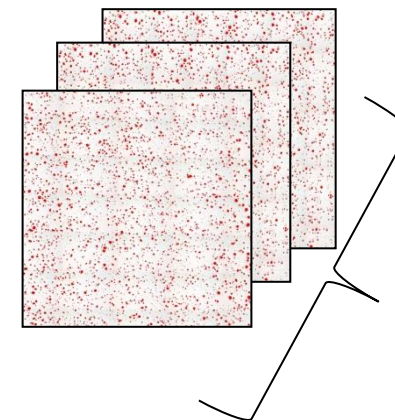


108 zusammengesetzte Bilder, Objektiv 100x
~ 10 x 10 mm²



Analyse und Auswertung: AnalySIS[®]

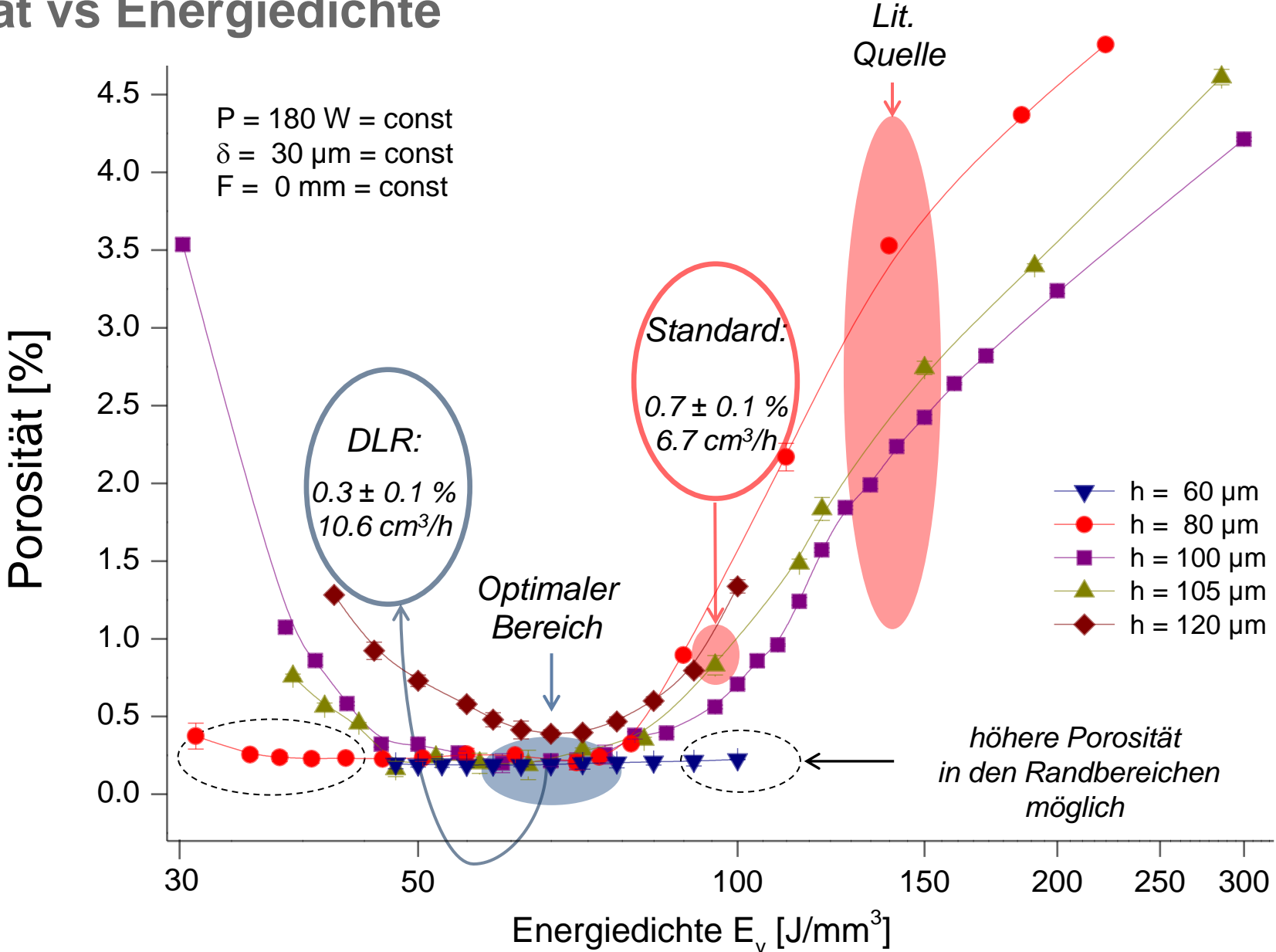
2D Porosität $\Phi = \sum$ aller Defekte



Mittelwert
von 3 parallelen
Längsschnitten
von ca 10 x 10 mm²



Porosität vs Energiedichte

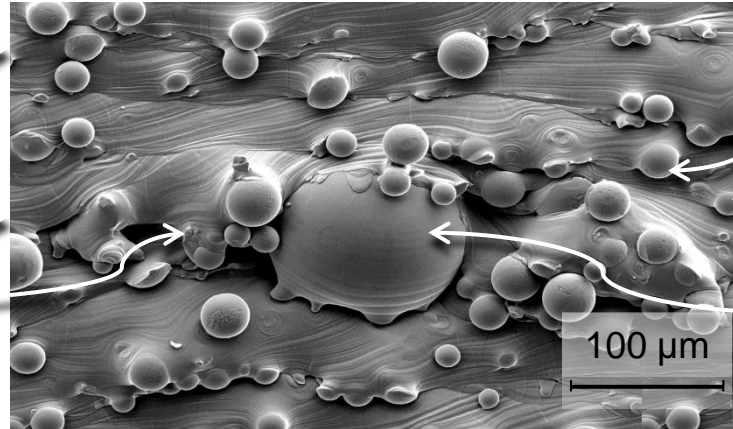


II. Optimierung der Kontur-Parameter



Primäre Rauheit:

- Stufeneffekt durch diskrete Schichtdicken
- Abfließen der Schmelze



Sekundäre Rauheit:

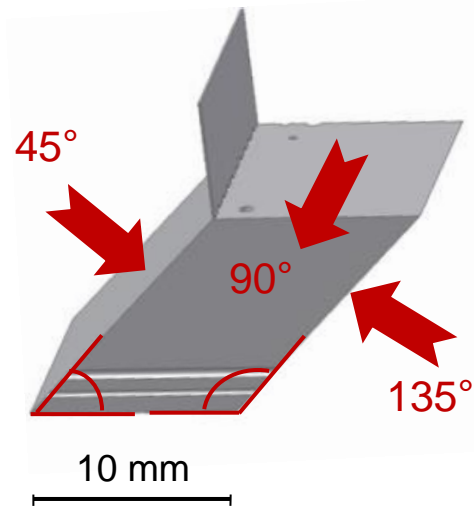
- anhaftende und unvollständig aufgeschmolzene Partikel
- „Balling“-Effekt

Konturenergie:

$$E_L = \frac{P}{v} \text{ , [J/mm]}$$

wo:

P - Leistung, W
 v - Geschwindigkeit, mm/s



Rauheitsprobe



variable Rauheitselemente

$$E_{L,j}, P_j, v_k$$

Scanstrategie für den Bauteil:

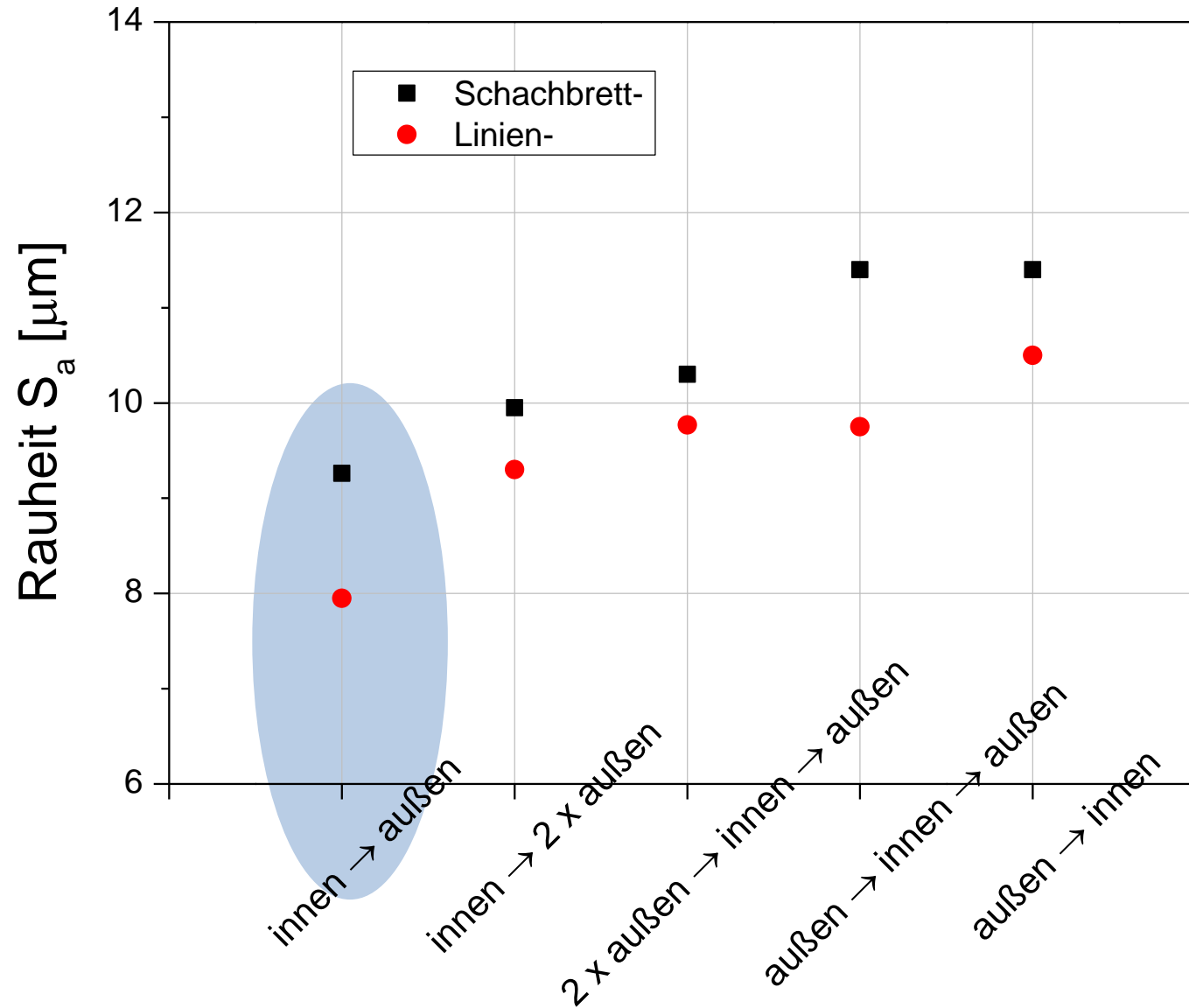
- Linien-
- Schach-

Scanfolge:

- „innen → außen“,
- „innen → 2x außen“,
- „außen → innen → außen“,
- „2x außen → innen → außen“,
- „außen → innen“

ZEISS® LSM 700
 ISO 25178

Einfluss der Laser-Scanfolge in der Fertigung



90°

Konturen:

$E_L = 0.113 \text{ J/mm}$

$P = 180 \text{ W}$

$v = 1600 \text{ mm/s}$

Volumen-
Scanstrategie:

■ Schachbrett-

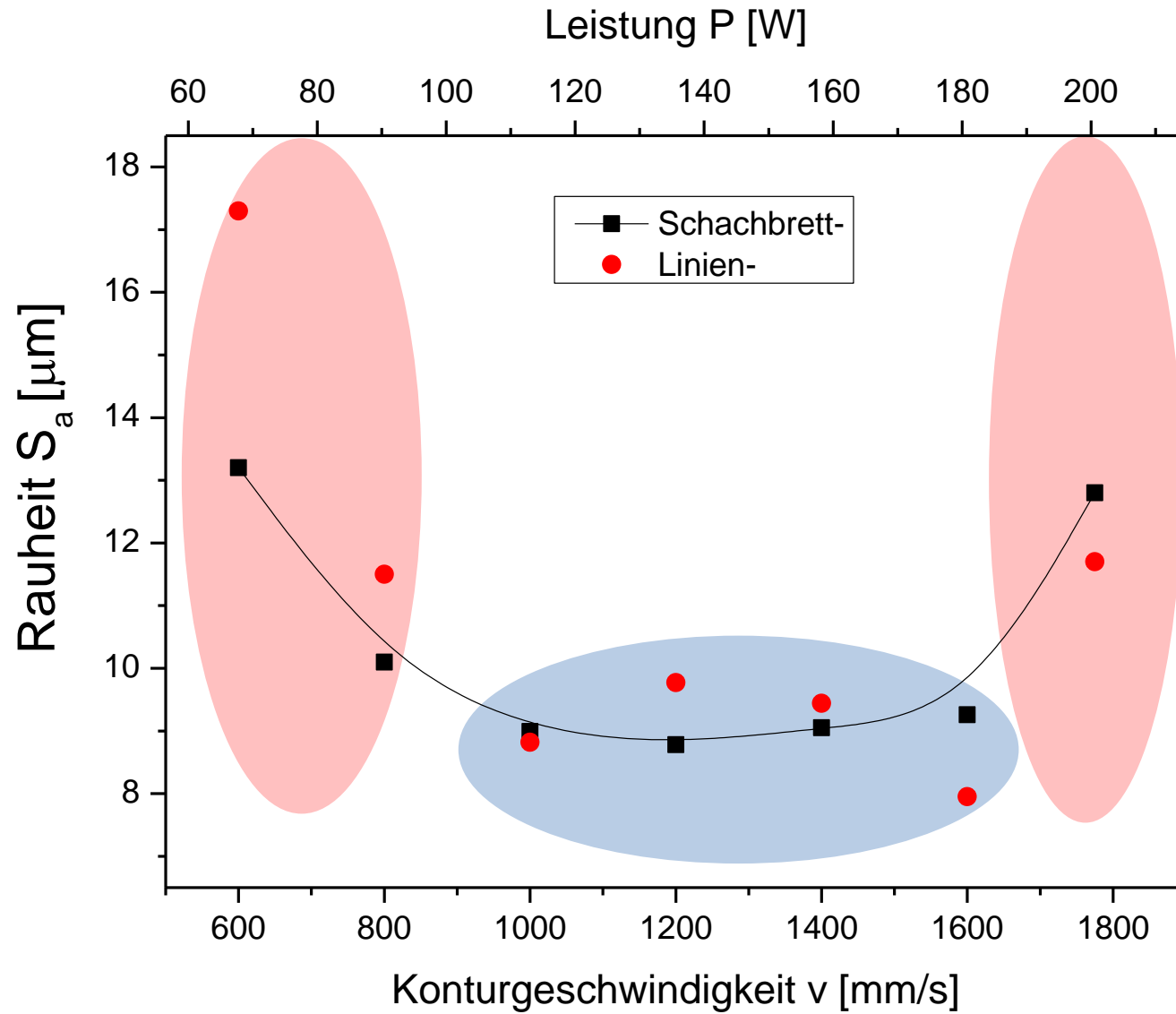
● Linien-

Analysierte Bereiche:

2.44 x 2.44 mm²

ZEISS® LSM 700
ISO 25178

Variationen „Leistung ↔ Geschwindigkeit“ bei $E_L = \text{const}$



90°

Konturen:

E_L , J/mm	P , W	v , mm/s
0.113	67.5	600
	90	800
	112.5	1000
	135	1200
	157.5	1400
	180	1600
	199.7	1775

Analysierte Bereiche:
2.44 x 2.44 mm²

Volumen-

Scanstrategie:

■ Schachbrett-

● Linien-

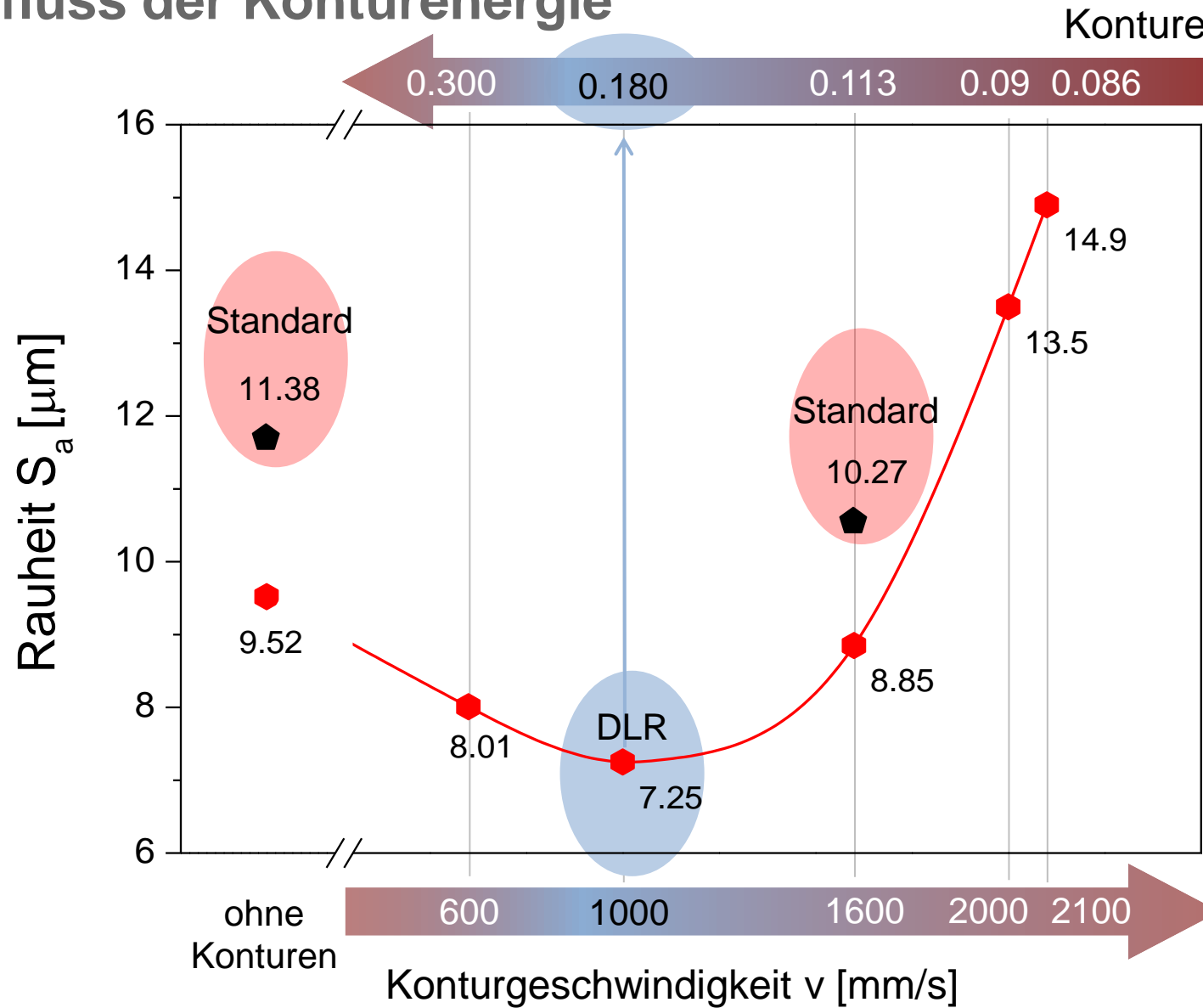
Kontur-

Scanstrategie:

innen → außen

ZEISS® LSM 700
ISO 25178

Einfluss der Konturenergie



90°

Volumen-
Scanstrategie:
Schachbrett

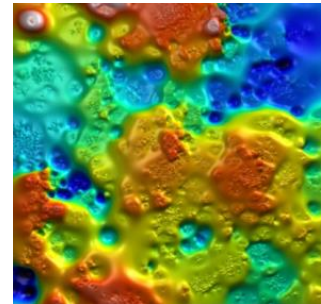
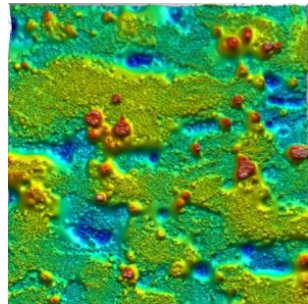
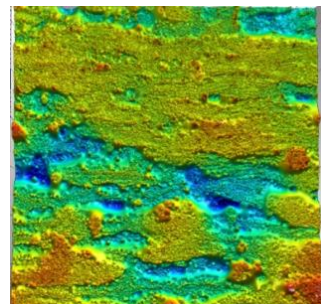
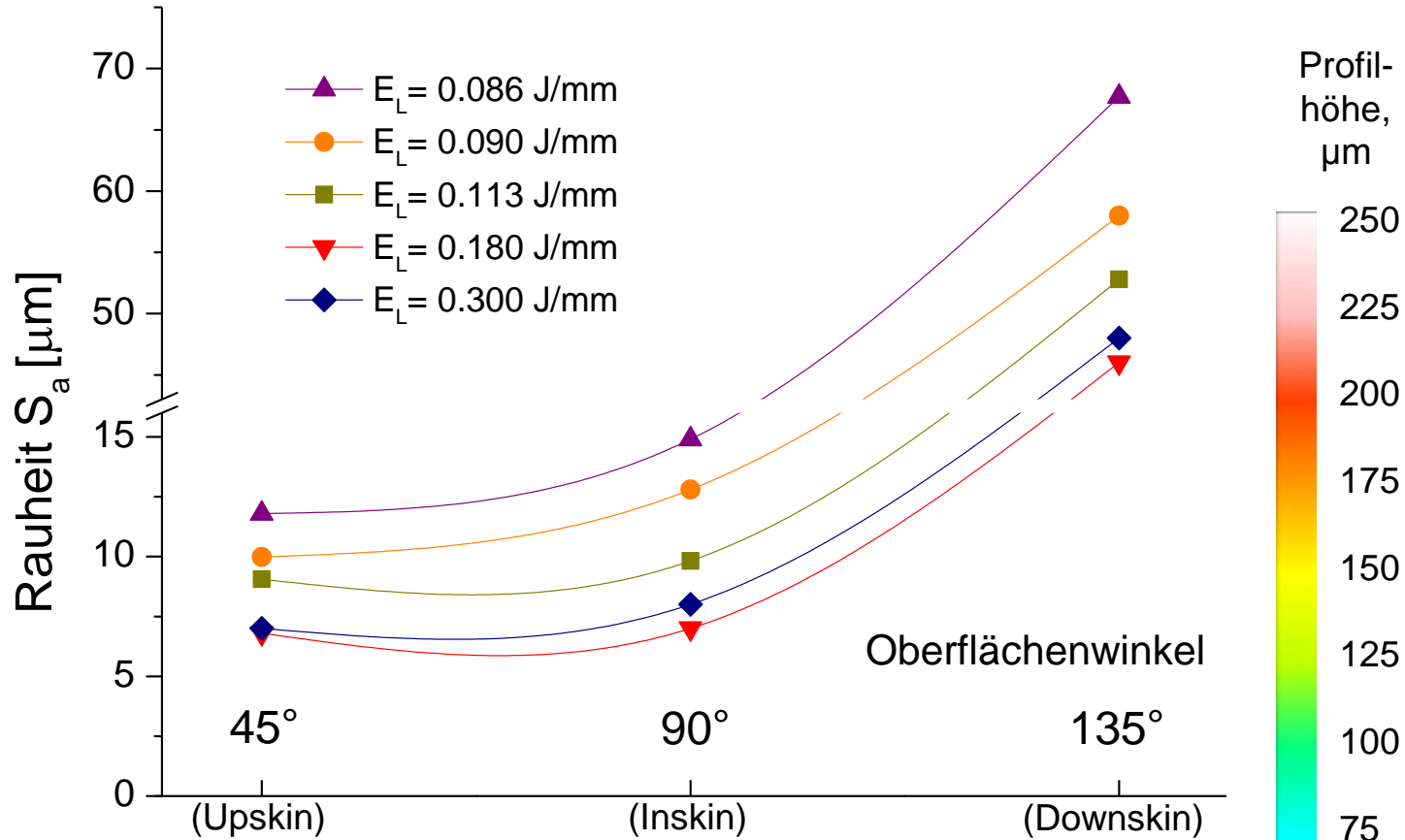
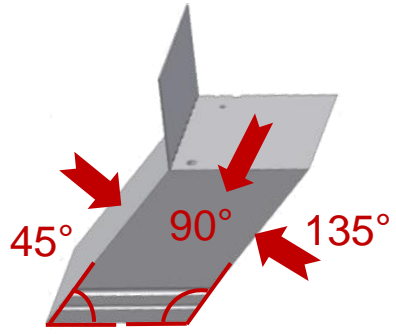
Kontur-
Scanstrategie:
innen → außen

$P = 180 \text{ W} = \text{const}$

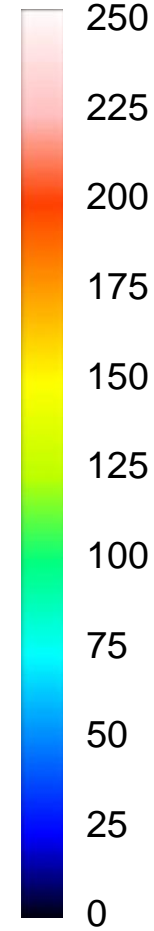
Analysierte Bereiche:
2.44 x 2.44 mm²

ZEISS® LSM 700
ISO 25178

Rauheitswerte für angewinkelte Oberfläche



Profilhöhe, μm



Volumen-Scanstrategie: *Schachbrett*

Kontur-Scanstrategie: innen \rightarrow außen

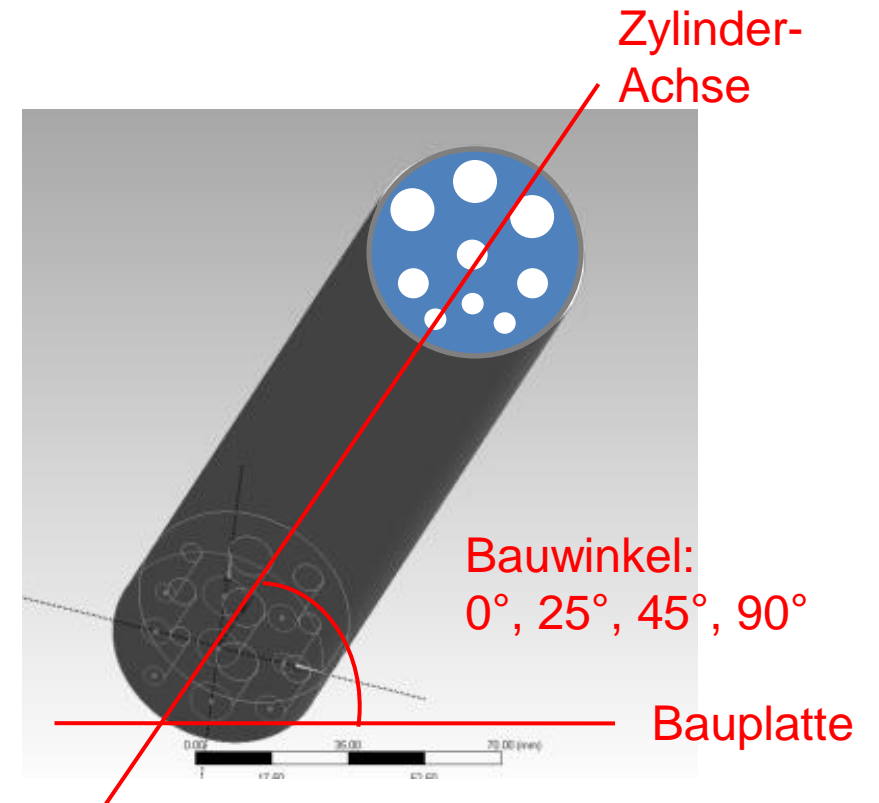
$P = 180 \text{ W} = \text{const}$

Analysierte Bereiche: $2.44 \times 2.44 \text{ mm}^2$

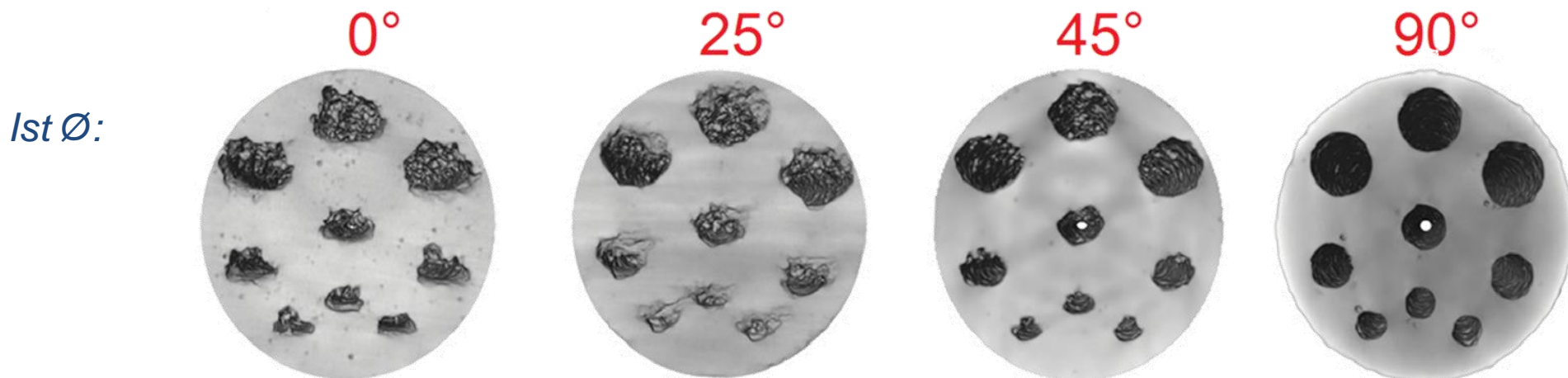
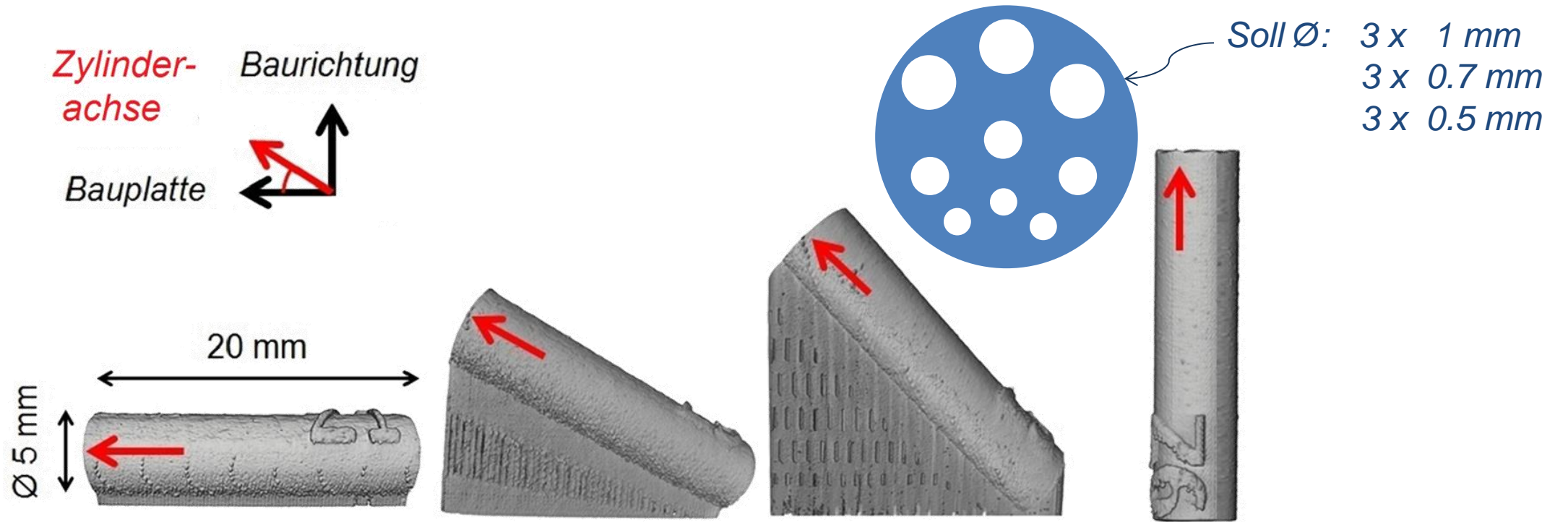
ZEISS® LSM 700
ISO 25178

Bildergröße: $0.64 \times 0.64 \text{ mm}^2$

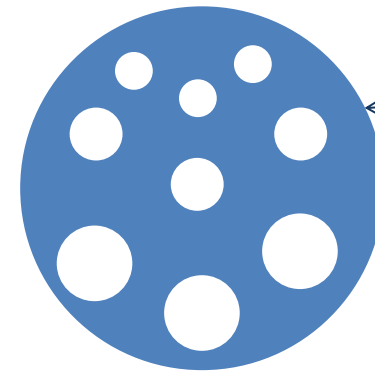
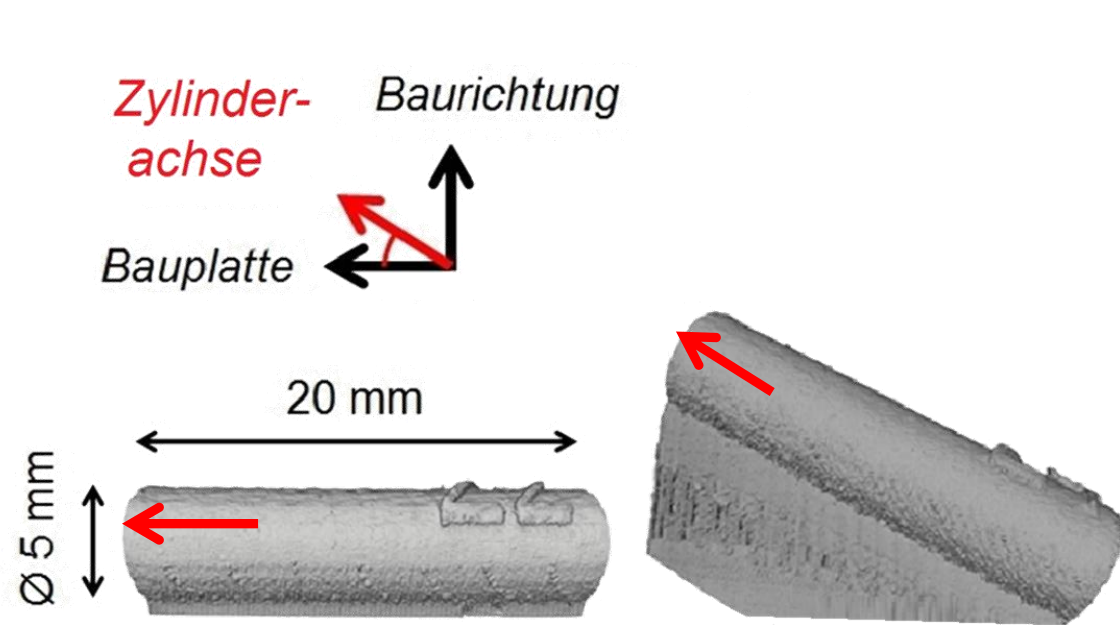
III. Einfluss der Baurichtung auf die inneren Kanalstrukturen



Innere Kanäle vs Bauwinkel (Rundform)

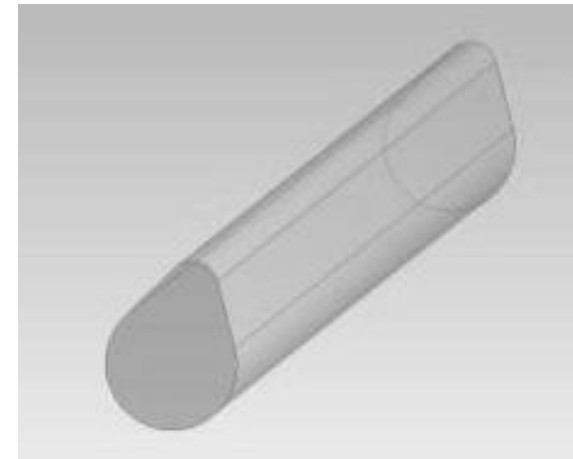


Innere Kanäle vs Bauwinkel (Tropfenform)

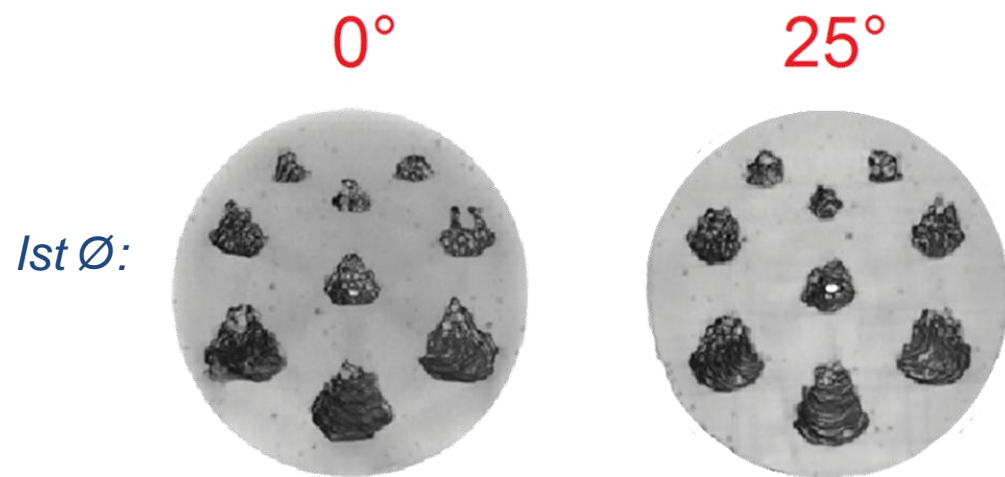


Soll Ø: 3 x 1 mm
3 x 0.7 mm
3 x 0.5 mm

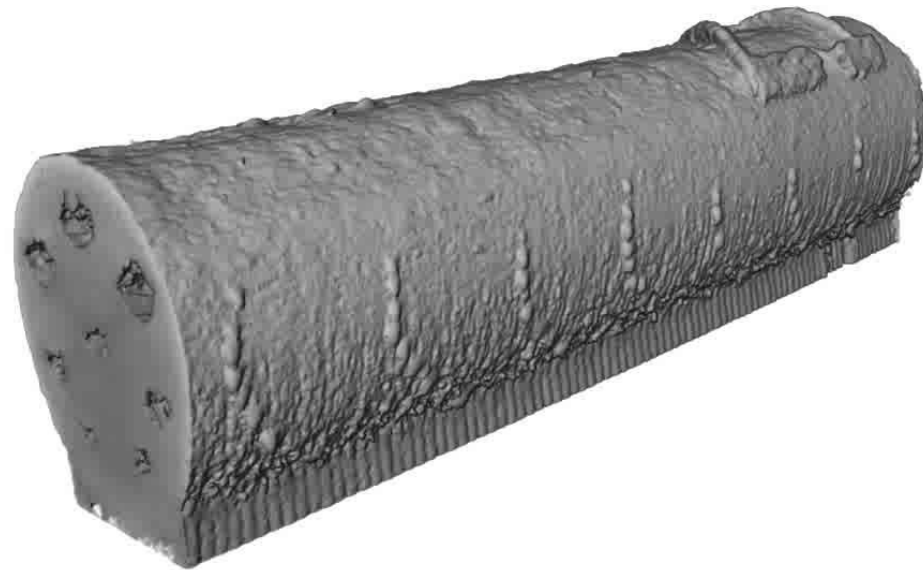
Tropfenform:



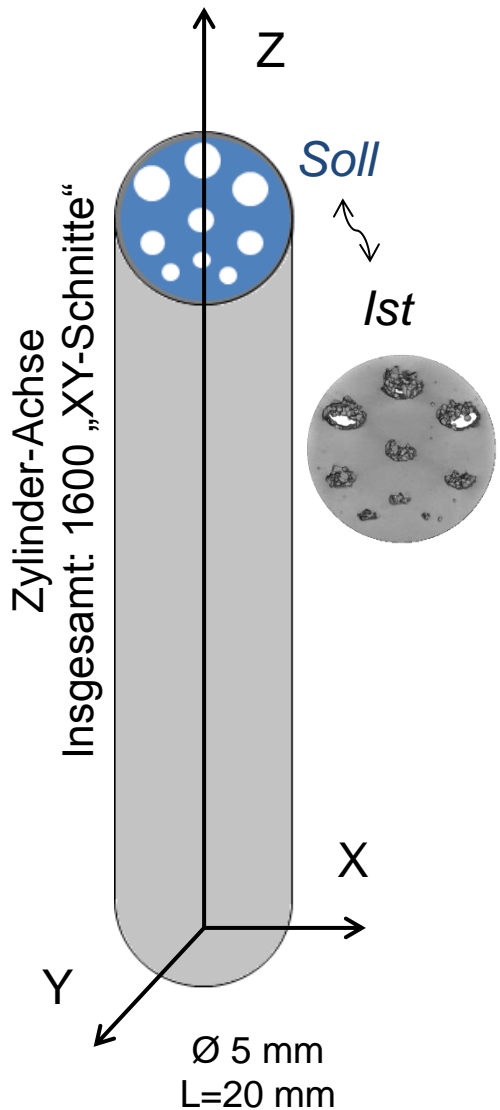
Kanalgeometrie: DLR-AT



Position: 0°, Sollform: Rund



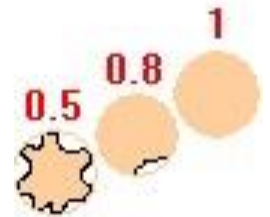
Quantitative Messparameter:



2D: abhängig von Zylinderachse
(in XY Schnitten)

Rundheit:

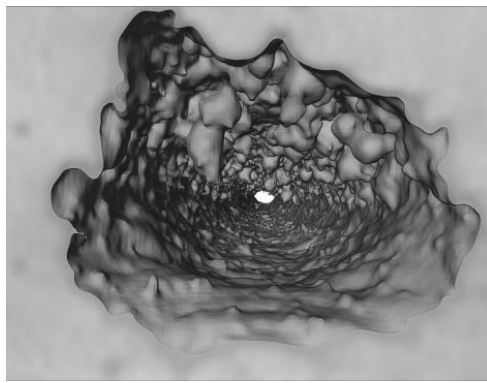
$$\frac{4\pi \times A}{P^2}$$



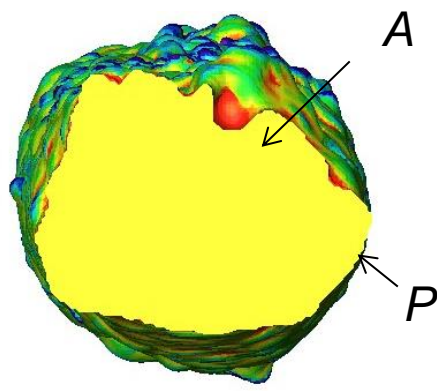
Äq. Durchmesser:

$$\sqrt{\frac{4 \times A}{\pi}}$$

wo: A – Fläche
P - Umfang



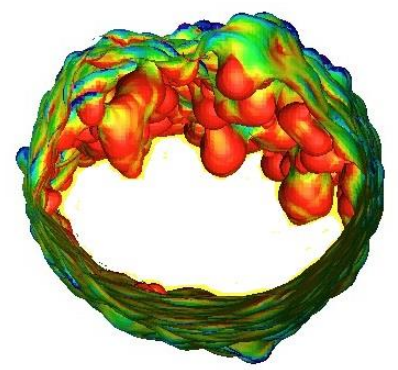
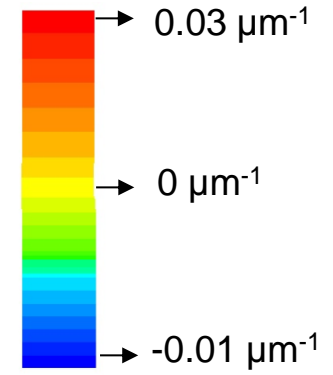
Frontansicht
Position: 0°, Soll Ø: 1 mm



3D orthographische Ansicht,
gelb: ein XY-Schnitt

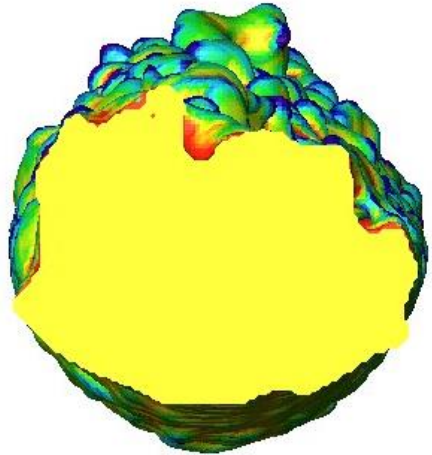
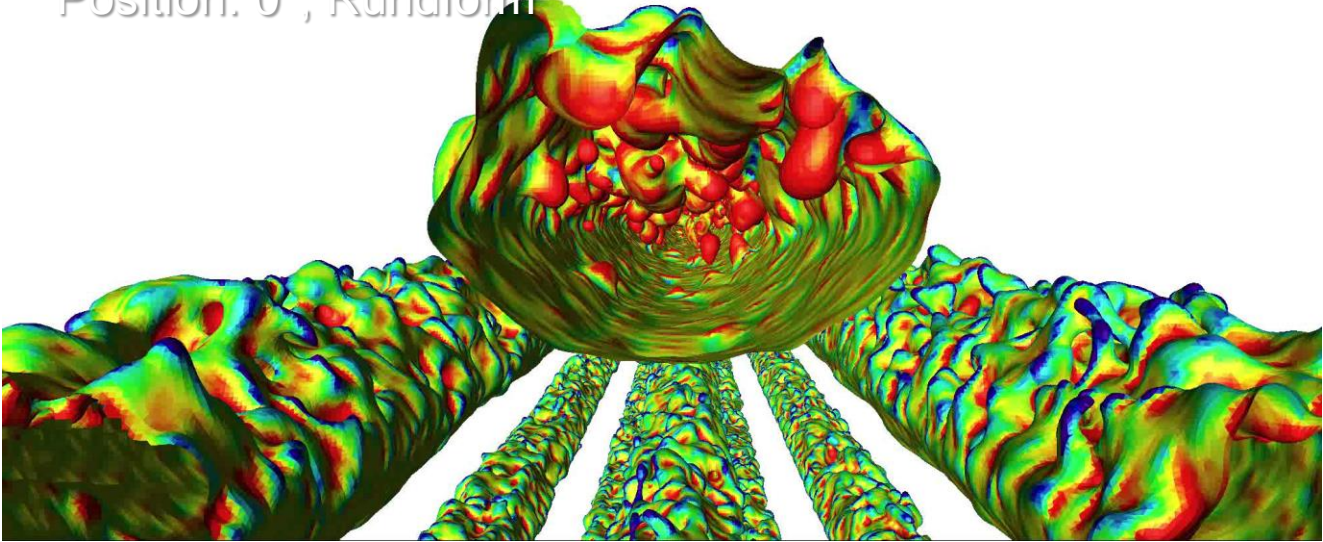
3D: Krümmungs-
verteilung:

Mittlere Krümmung:

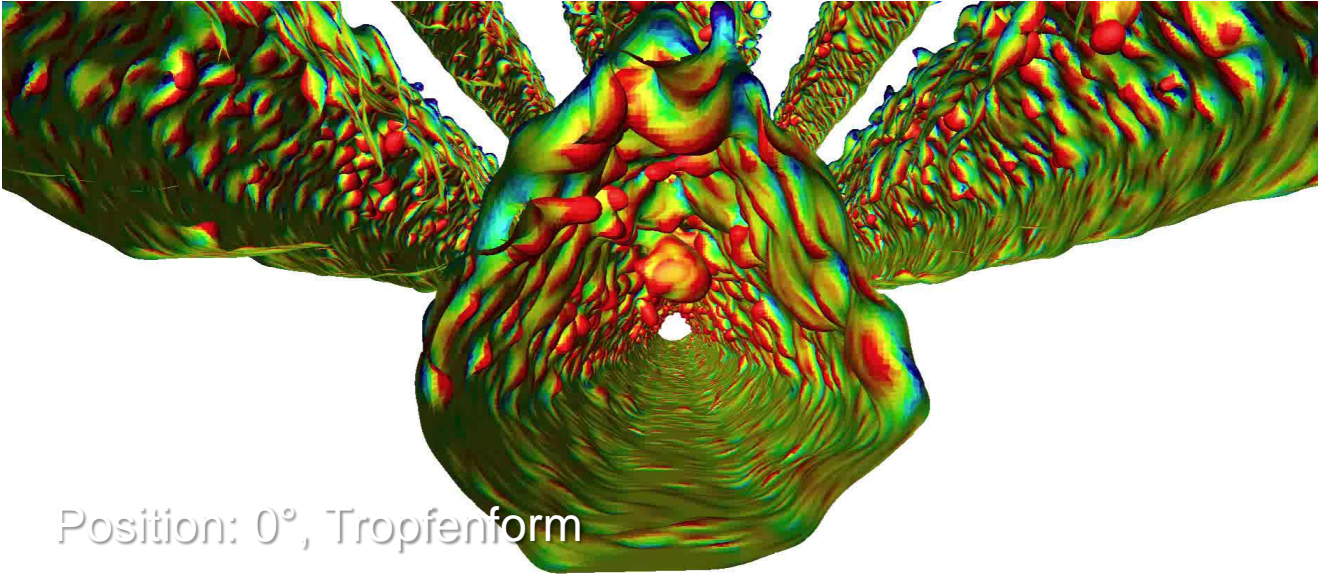


AVIZO® Software

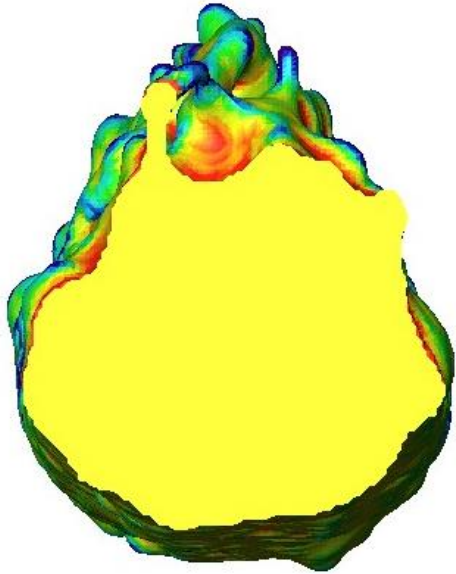
Position: 0°, Rundform



● 0.47 Ø 879

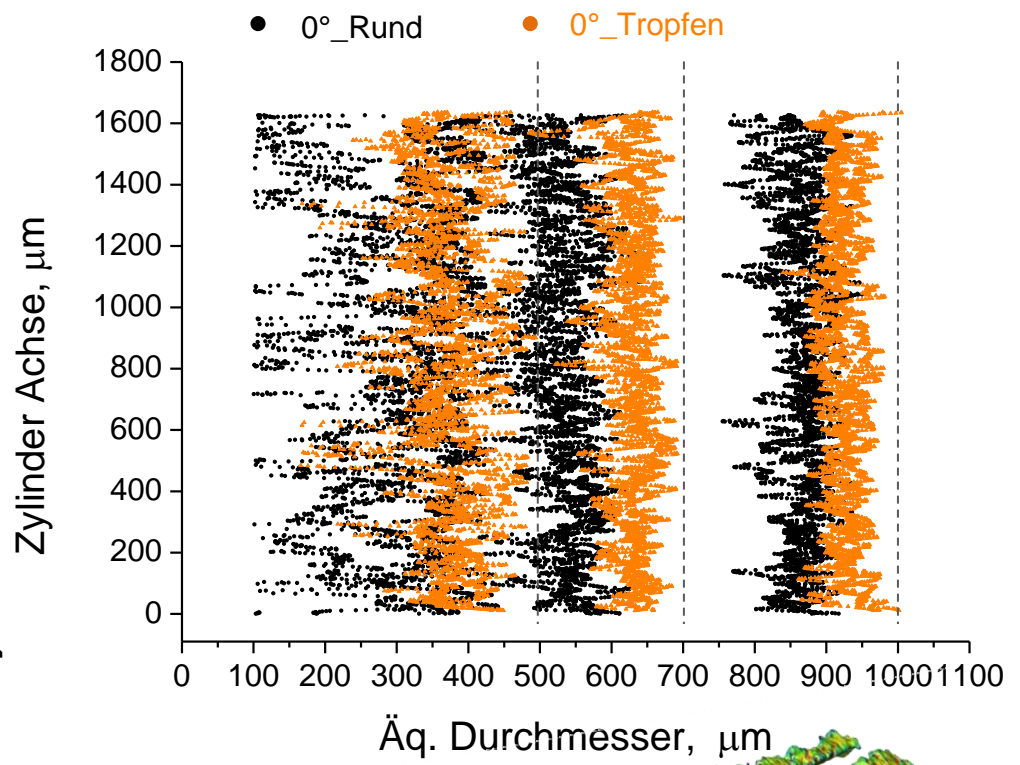
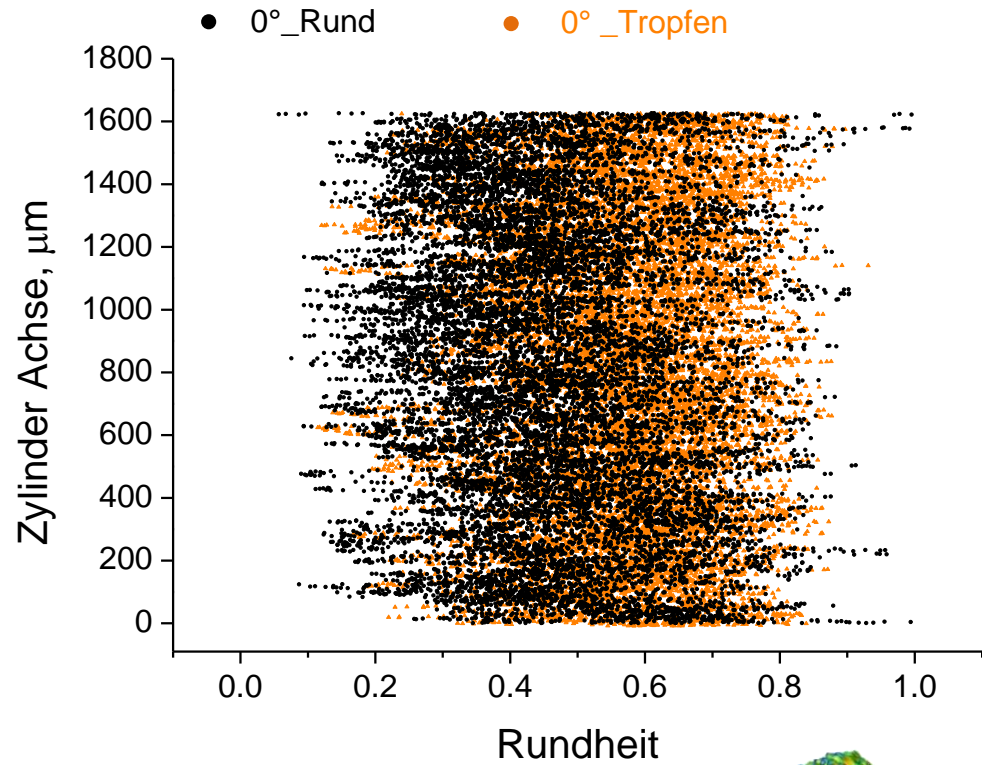


Position: 0°, Tropfenform

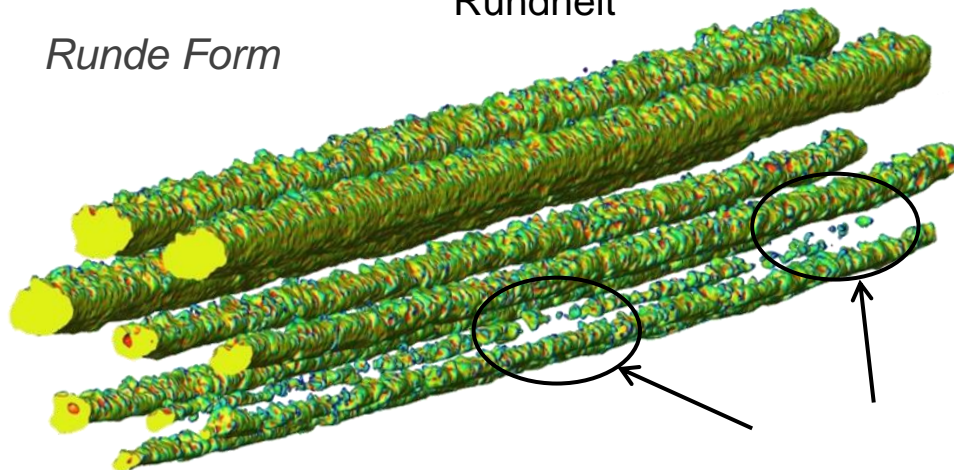


● 0.57 Ø 910

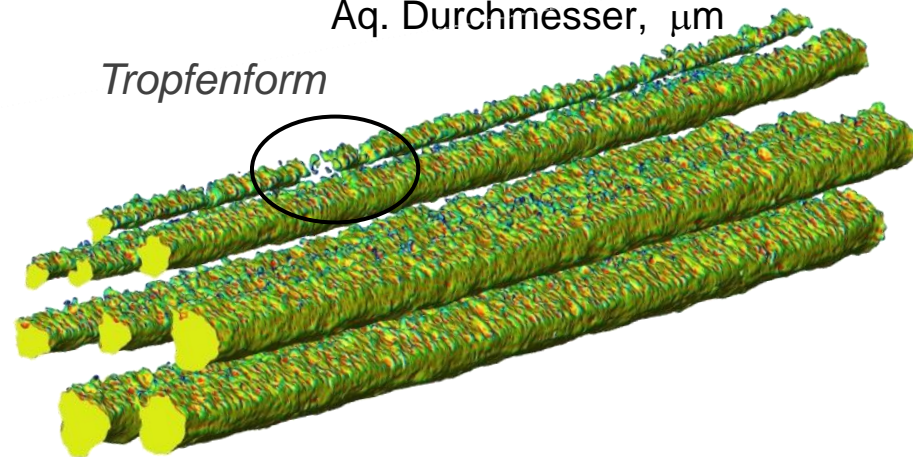
0° Neigung: Rund- vs Tropfenform



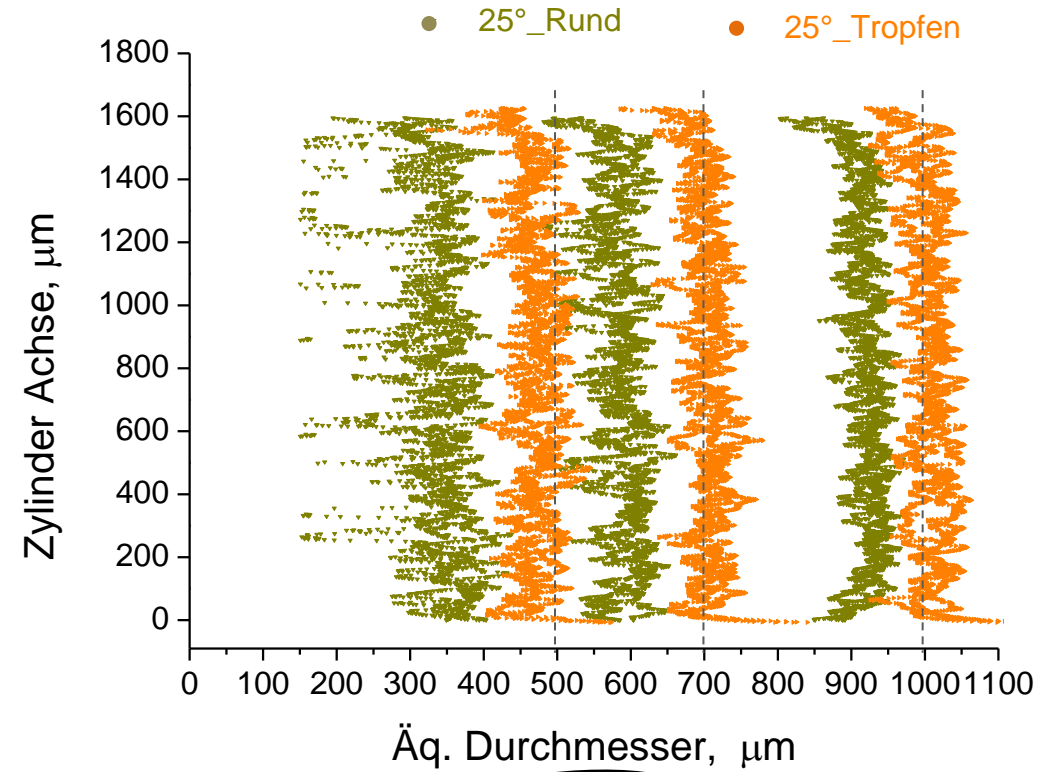
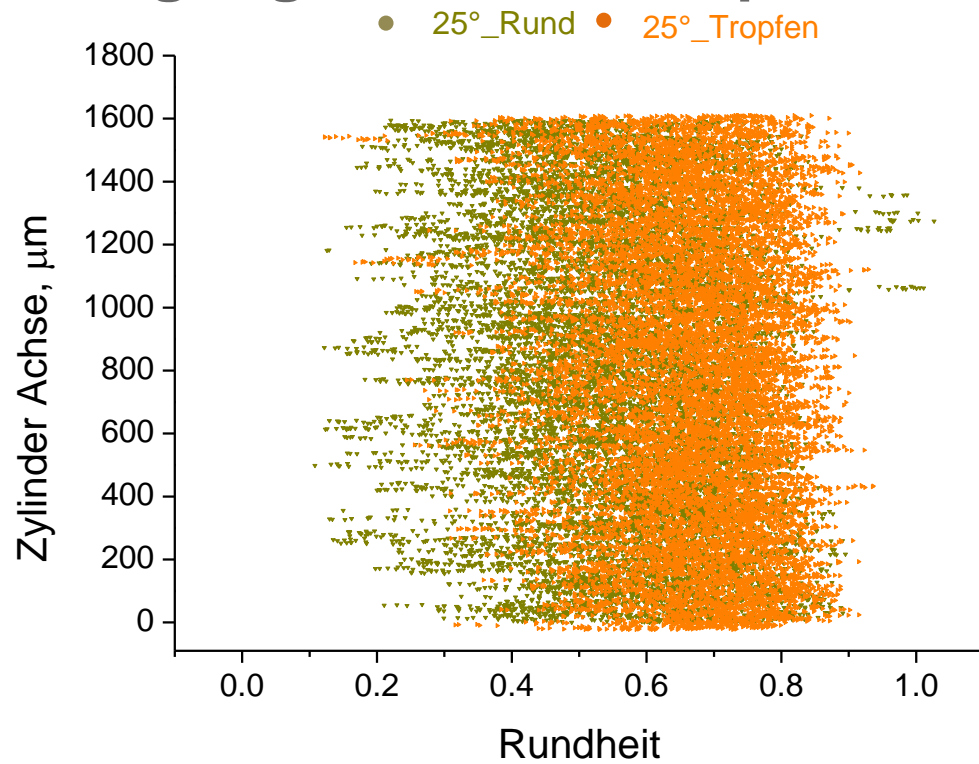
Runde Form



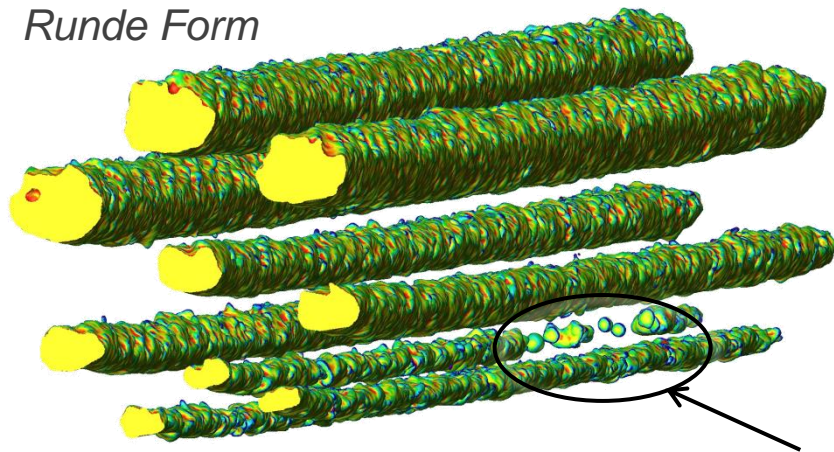
Tropfenform



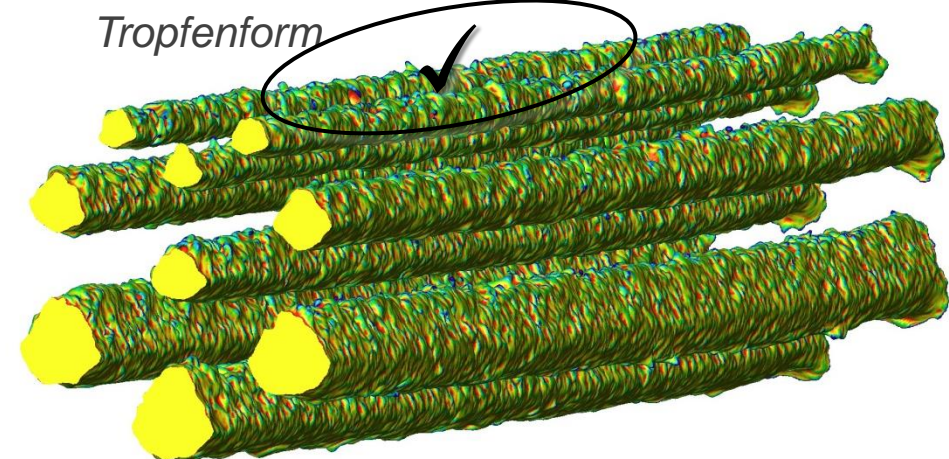
25° Neigung: Rund- vs Tropfenform



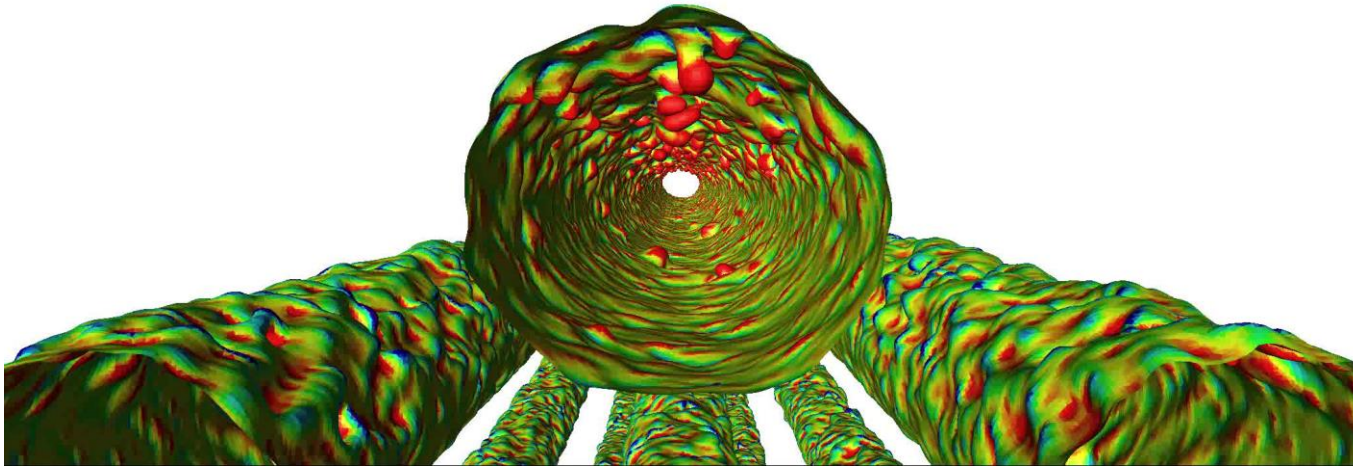
Runde Form



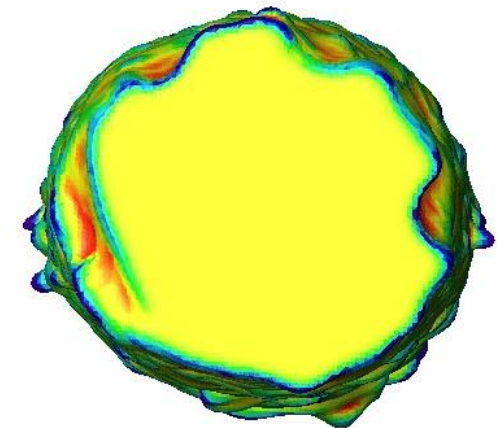
Tropfenform



Position: 45°, Rundform

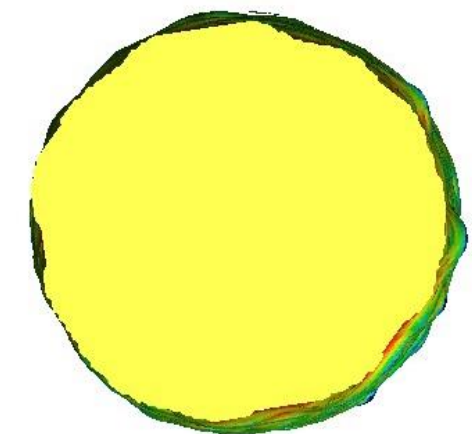
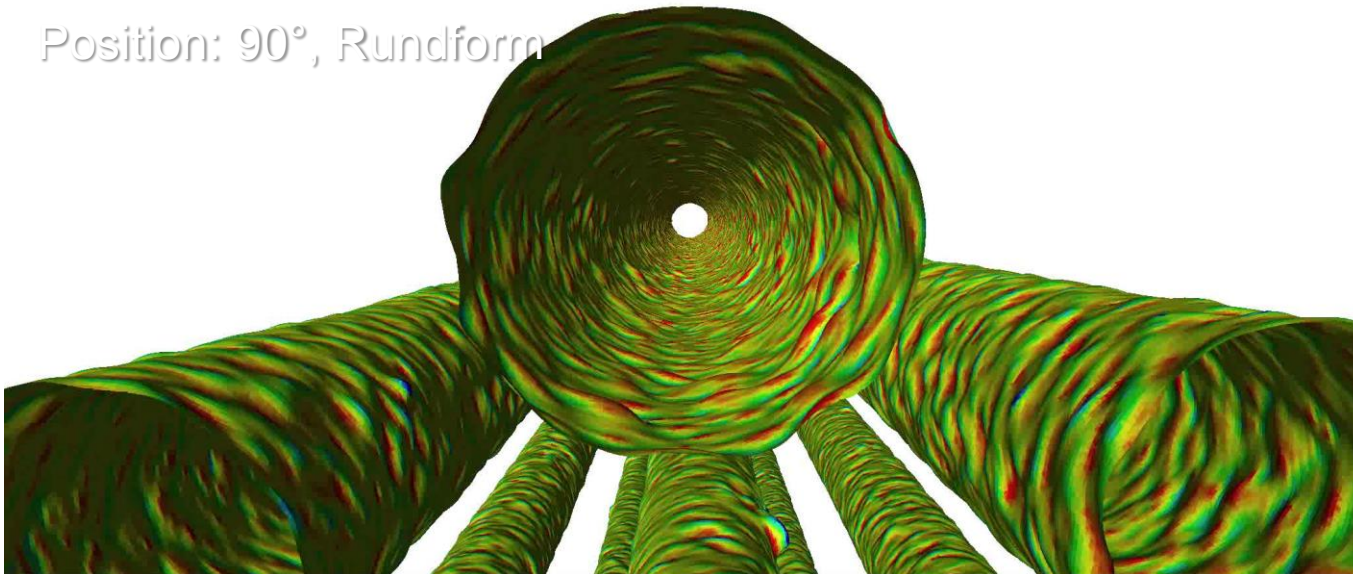


Folie 23



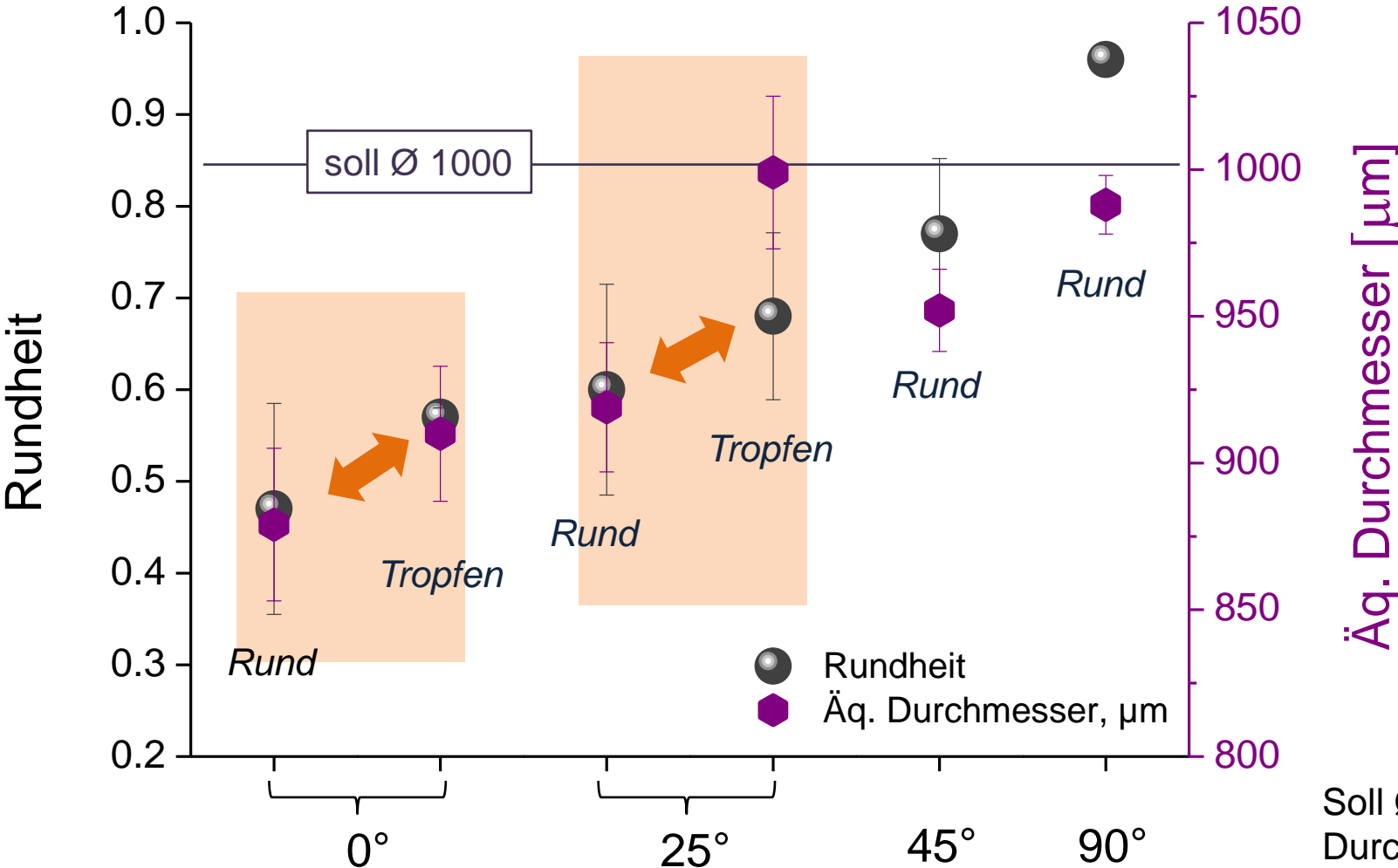
● 0.77 Ø 952

Position: 90°, Rundform



● 0.96 Ø 988

Einfluss des Bauwinkels auf die inneren Kanäle



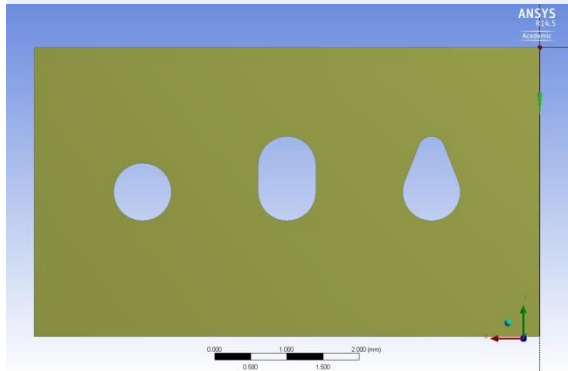
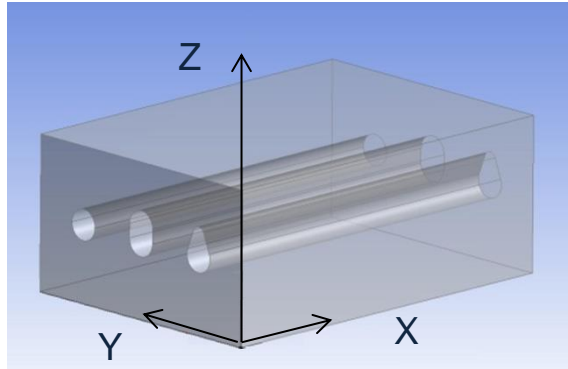
Soll Ø 1000 µm
Durchschnittlich über Kanallänge
Mittelwert von 3 Kanälen



IV. Optimierung der inneren Kanalstruktur



Optimierung der Kanalstruktur



Äq. Ø (für Soll Ø: 1 mm)		
Kreis	Oval	Tropfen
1.00	1.26	1.15
1.00	1.21	1.11

→ 22.5°

→ 45°

Kanalgeometrien: DLR-AT

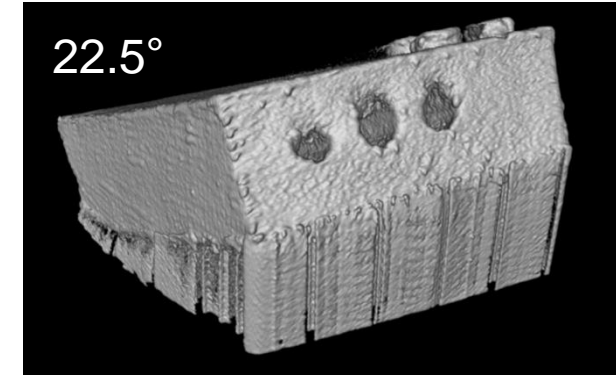
- ▶ Form der Kanäle:
 - Kreis
 - Oval
 - Tropfen

- ▶ Vertikale XZ-Neigung:
 - 22.5°
 - 45°

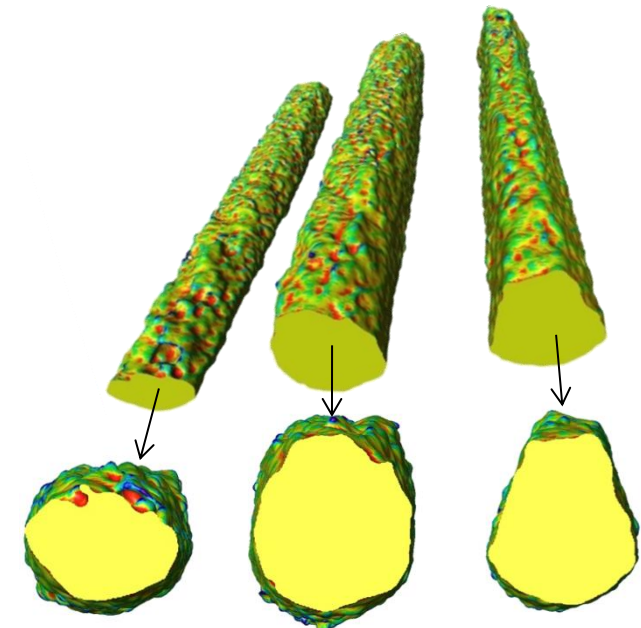
- ▶ Horizontale XY-Position:
 - 0°, 30°, 60°, 90°

- ▶ Soll Ø (bzw. Kanalbreite)
 - 1 mm
 - 0.8 mm

- ▶ SLM-Parameter (Volumenbauteil & Konture):
 - Standard
 - DLR

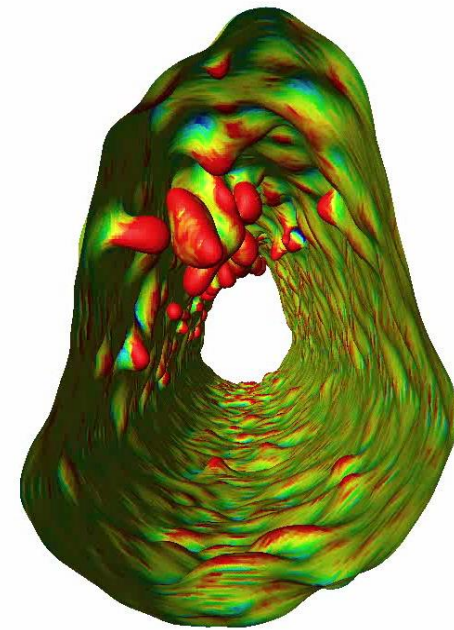
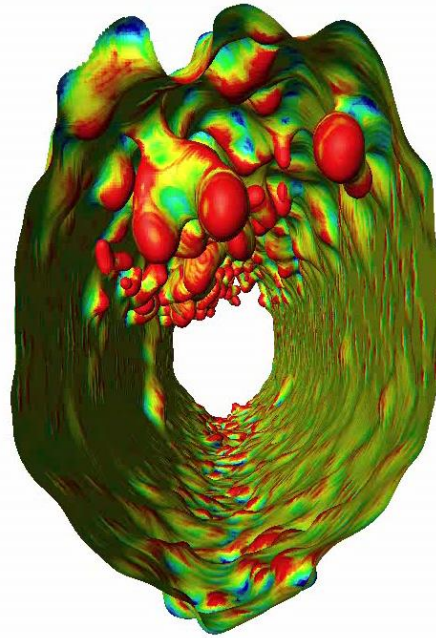
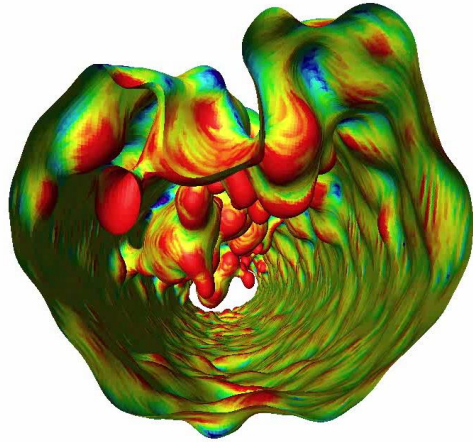


ca 50 variable Testelemente



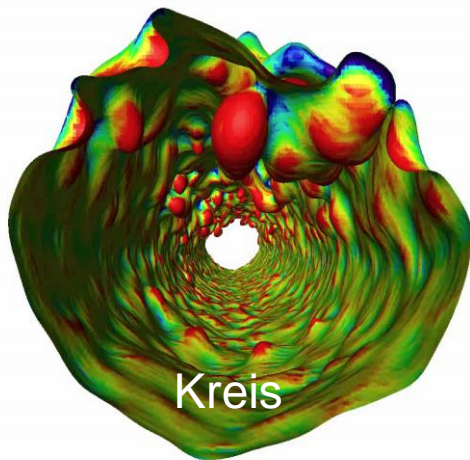
Phoenix[®] Nanotom Tomograph
datos|x_reconstruction[®], AVIZO[®]

Standard: 22.5°

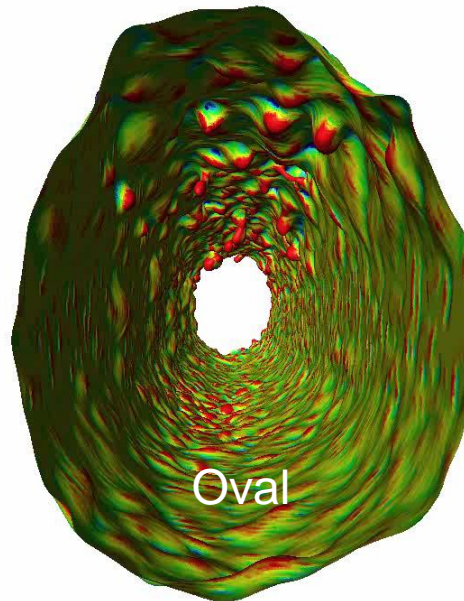


Folie 27

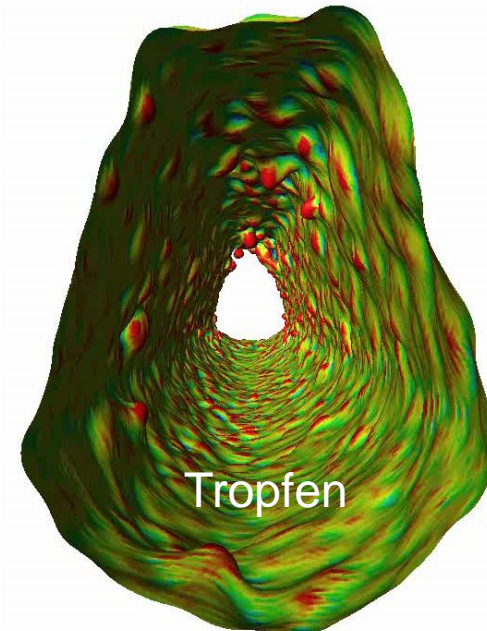
DLR: 22.5°



Kreis

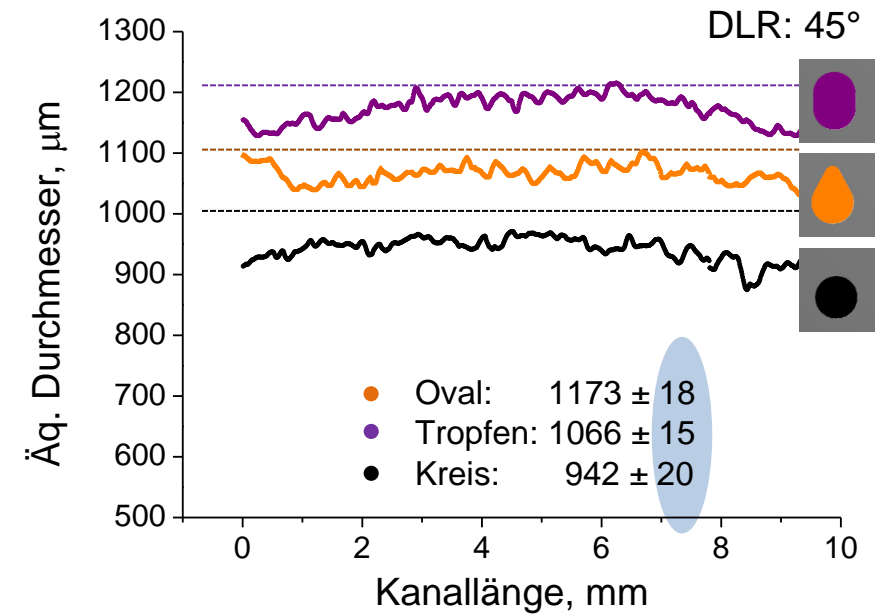
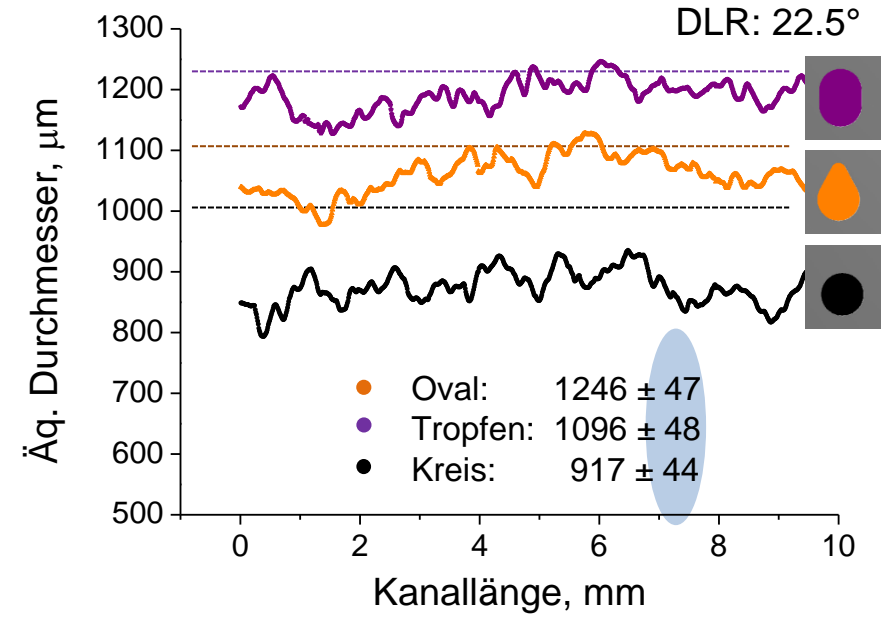
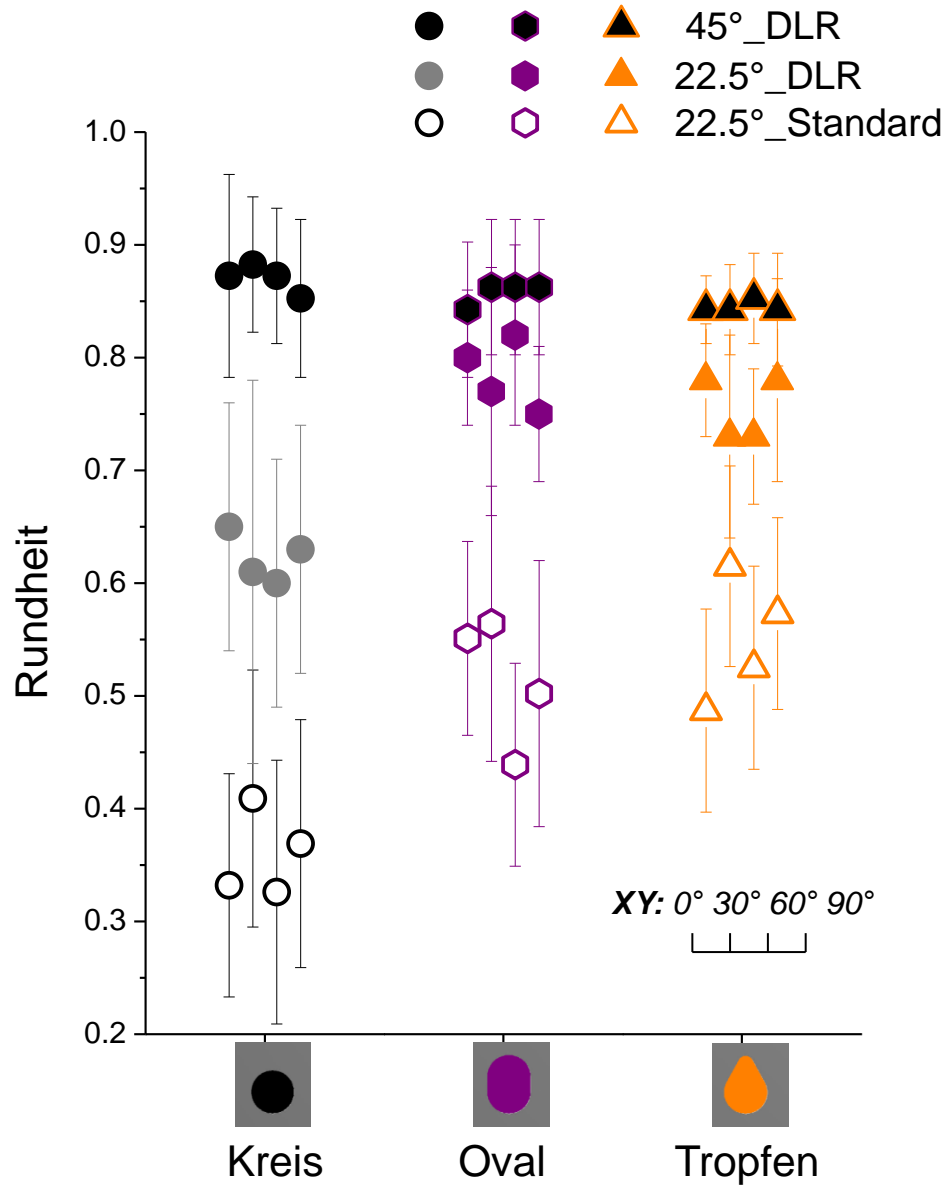


Oval



Tropfen

Kanalstruktur: Standard vs DLR



1. Volumen und Konturstrategien optimiert:

- Porosität $\leq 0.3 \pm 0.1$ %
- Baurate $10.6 \text{ cm}^3/\text{h}$
- Rauheit S_a für 90° : reduziert $7.25 \text{ }\mu\text{m}$

2. Fertigungsstrategien von Kanalstrukturen entwickelt:

- Bauwinkeleinfluss
- Abweichung vom gewünschten Durchmesser umso größer, je flacher der Bauwinkel
- Bei abnehmendem Bauwinkel steigt die Anzahl der Pulveranhaftungen, teils aufgeschmolzenen Pulverpartikel & Schmelzbahndefekte
- Höchste Geometrietreue bei der vertikalen (90°) Herstellung
- Positiver Effekt der Oval- & Tropfenkanalformen bei Neigungen bis zu 45°
- Liegende Position (0°) sollte vermieden werden



Verwendung der optimierten SLM-Prozessparameter in Kombination mit speziellen Kanalformen ermöglicht es, die Geometrietreue der Kanäle wesentlich zu verbessern:

- 22.5° : Rundheit von 0.4 (Standard) auf 0.8 (DLR) erhöht (für Oval- & Tropfenkanalformen), Äq.Durchmesserabweichung: $< 50 \text{ }\mu\text{m}$
- 45° : Rundheit von 0.7 (Standard) bis zu 0.9 (DLR) für alle Kanalformen, Äq.Durchmesserabweichung: $< 20 \text{ }\mu\text{m}$

Danke für die Aufmerksamkeit

Galina.Kasperovich@dlr.de

