

C4 - Geometrische Bauteilprüfung

Abschlusskolloquium des Sonderforschungsbereichs 814 –
Additive Fertigung
13. Juni 2023

Benjamin Baumgärtner, Tino Hausotte



Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg



Vision

In-Line-Prozessführung und -regulierung additiver Fertigungsprozesse durch kontinuierliche, inkrementelle und dimensionelle Bauteilinspektion

Detektion von

- Beschichtungsfehlern
- Aufschmelzverhalten
- Bauteilverzug
- „Missing Layers“

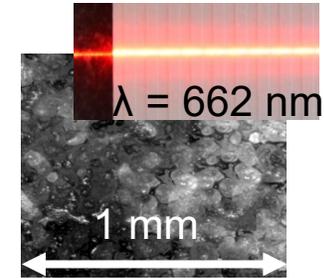


Wissenschaftliche Zielsetzung

Entwicklung qualifizierter Prüftechnik und Prüfstrategien für die inkrementelle In-Line-Inspektion in der additiven Fertigung

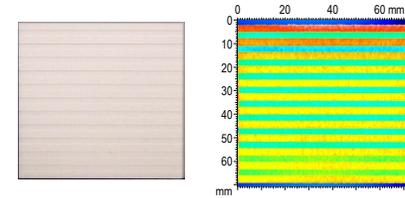
Anforderungsanalyse Prüftechnik und -prozesse

- Bestimmung der messtechnischen Anforderungen sowie Raum- und Umgebungsbedingungen
- Untersuchung zum kooperativen Verhalten von Polyamid-Pulver und -schmelze für optische Messverfahren



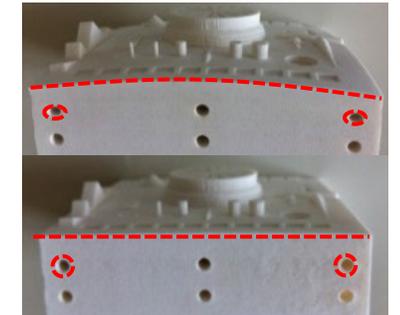
Prüfsystem- und Prüfprozesskonzeption

- Eignungsuntersuchung kommerzieller Messsysteme und Bewertung verschiedener Messprinzipien/-verfahren
- Prüfkörperentwicklung



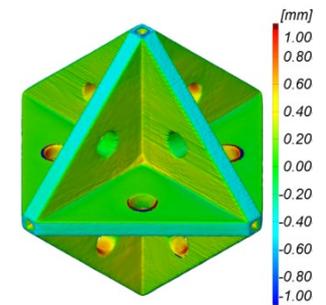
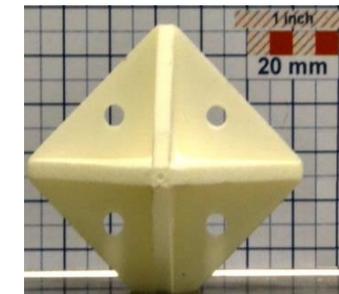
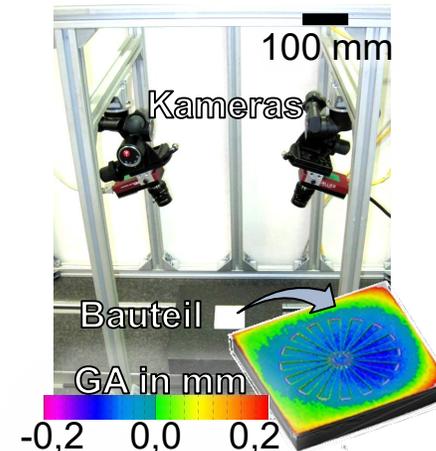
Prüf- und Messverfahrensentwicklung

- Entwicklung und Realisierung eines Demonstratorprüfstandes (inkl. Kalibrierstrategien)



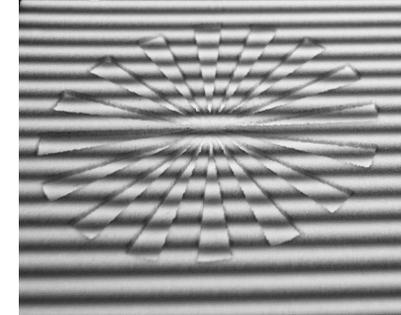
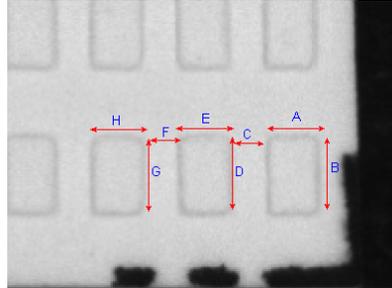
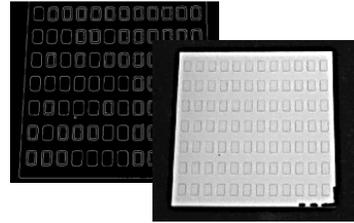
Mögliche Messungen:

- Detektion nicht aufgeschmolzener Bereiche, Curling sowie von Fehlern beim Pulverauftrag
- Erfassung und Berechnung der Kontur des aufgeschmolzenen Bereichs und Bauteils



Messung am Prüfstand und mit kommerziellen Streifenlichtprojektionssystemen

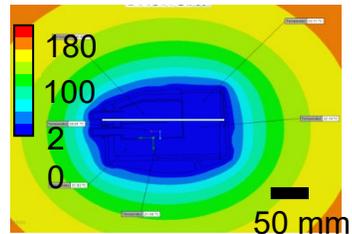
2D- und 3D-Messungen



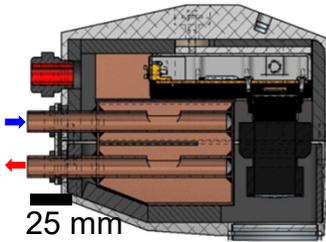
Integration des Prüf- und Messsystems

- Entwicklung von Maßnahmen zur aktiven Temperierung und zum Schutz des Messsystems sowie einer kinematisch bestimmten Montagelösung

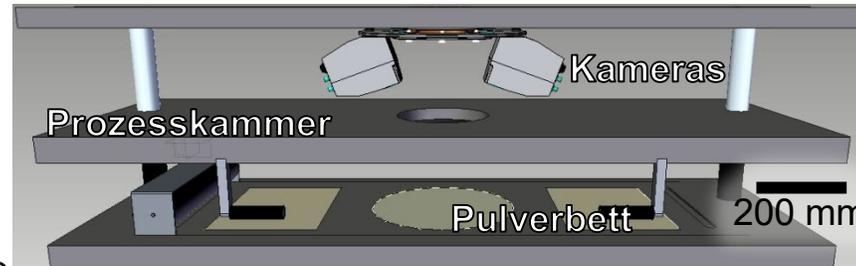
Temperatur in °C



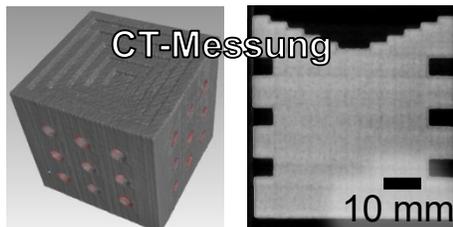
Simulierte Wärmeverteilung



Kühlgehäuse



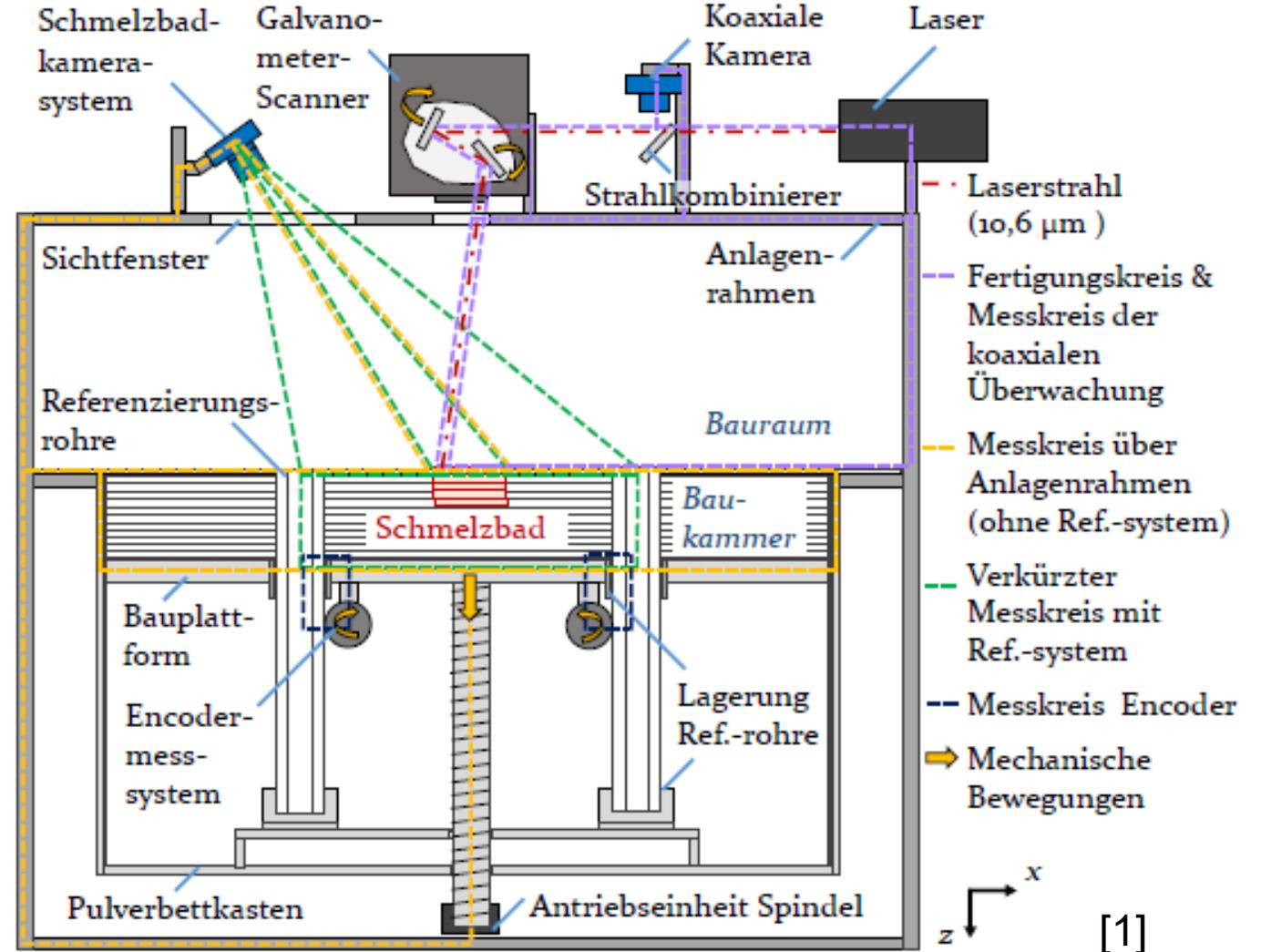
Voruntersuchungen zur Referenzierung mit Hilfe von beleuchteten Glasrohren sowie CT Untersuchungen



Wissenschaftliche Zielsetzung:

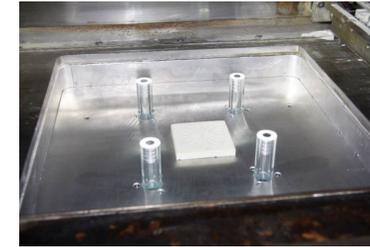
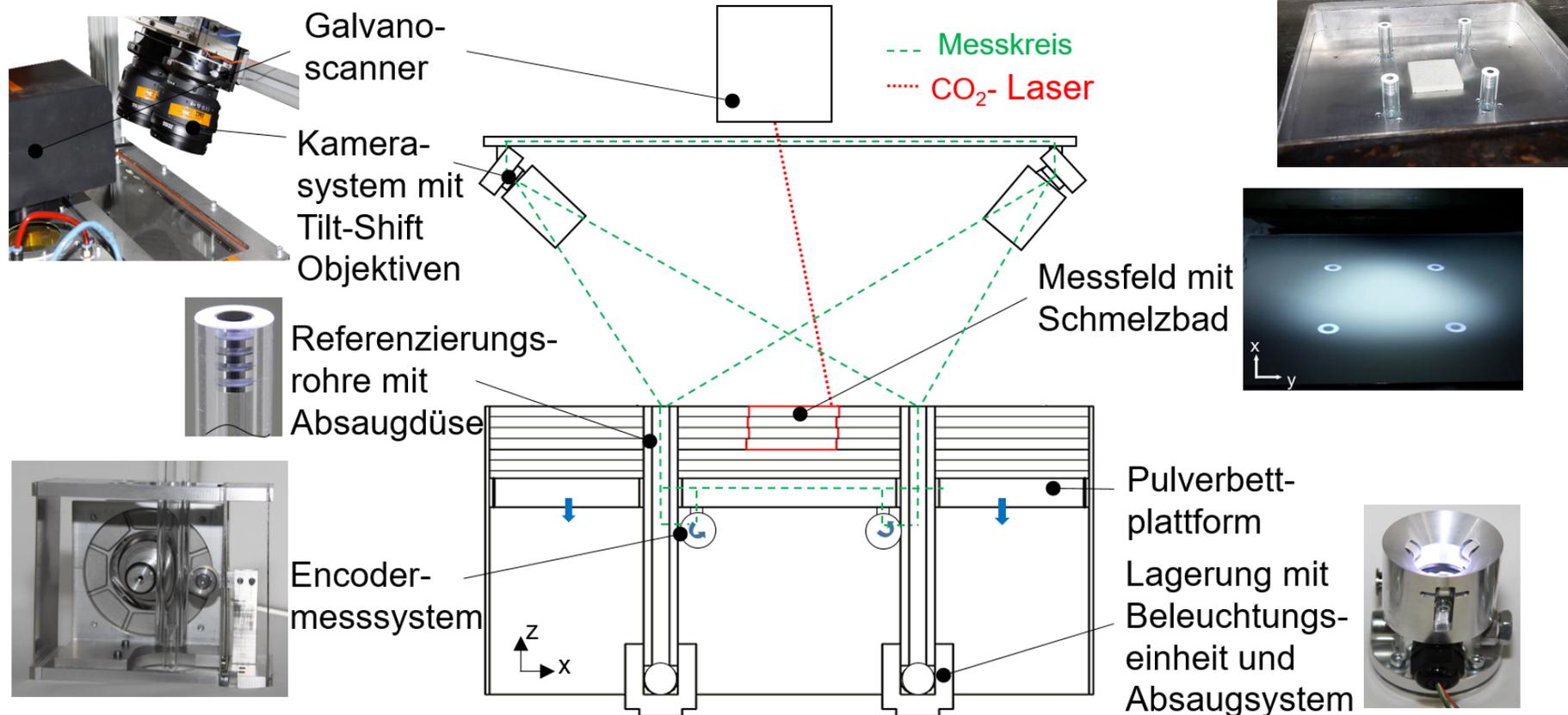
Mess- und Prüftechnik sowie Prüfstrategien für die schichtweise Inline-Inspektion in der additiven Fertigung

- Inline-Überwachung für die Bauteilgestalt relevanter Einflussparameter
- Erhöhung der Messgenauigkeit des optischen Inline-Messsystems durch eine optische Referenzierung des Pulverbetts sowie Verkürzung der metrologischen Kette
- Quantifizieren von Strategien zur Korrektur und Kompensation von Gestaltabweichungen auf Basis der detektierten kausalen Beziehungen

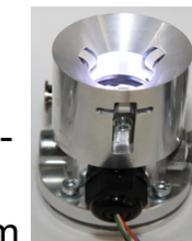
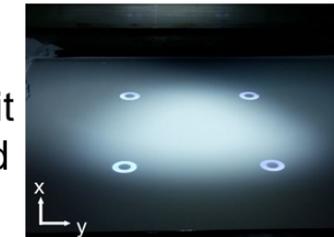


[1]

- **Optischen Inline-Messsystem mit optischer Referenzierung des Pulverbetts sowie Verkürzung der metrologischen Kreises**

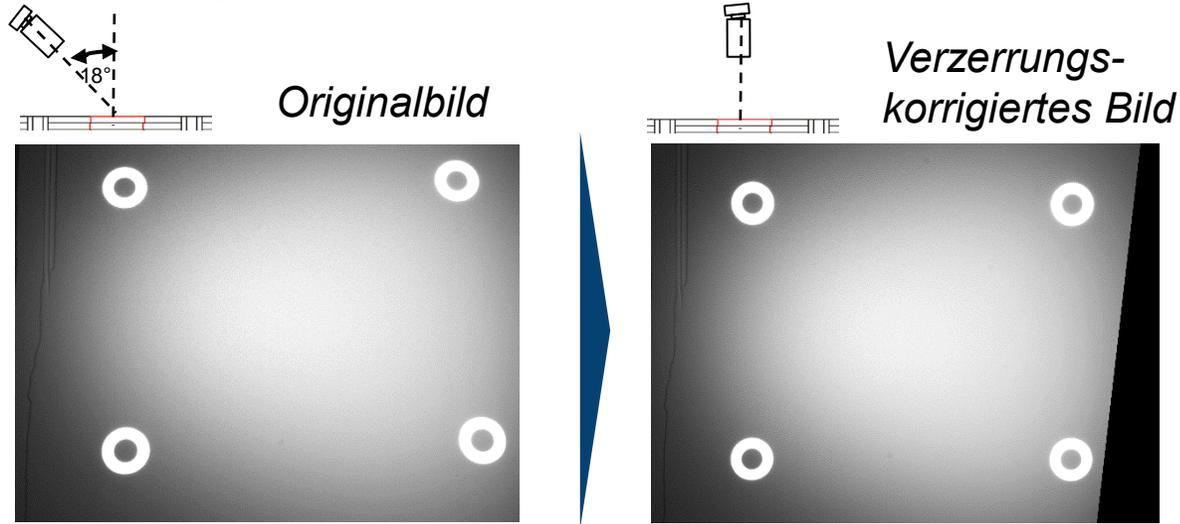


Pulverbettkasten für EOS P380

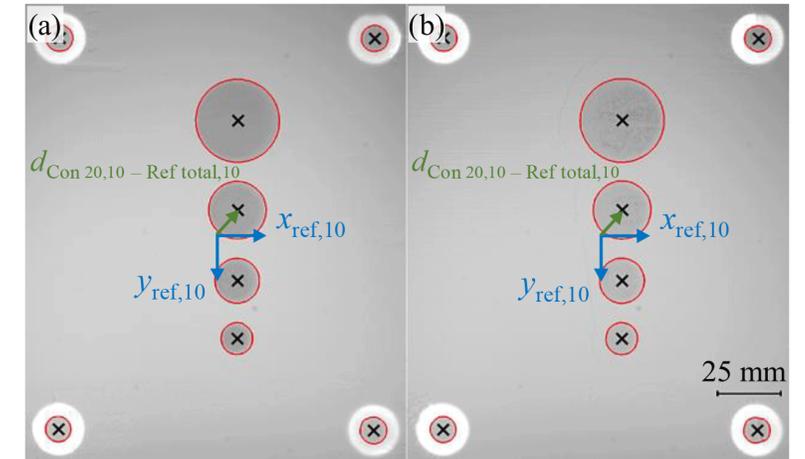


- zusätzliche Beleuchtung der Pulverbettfläche und zur Erzeugung von Schattenwürfen

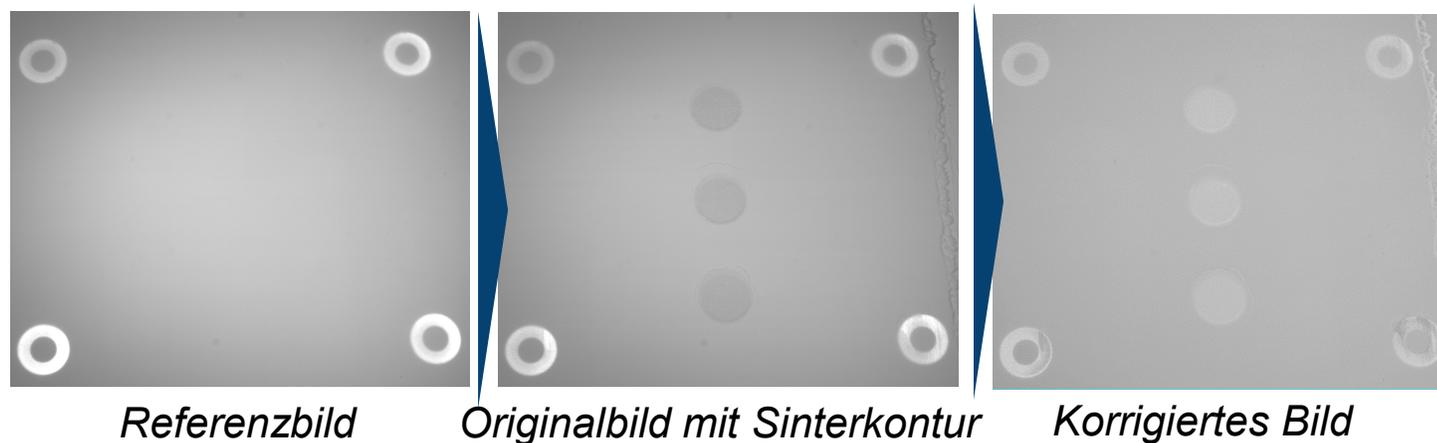
Verzerrungskorrektur



Positionsermittlung

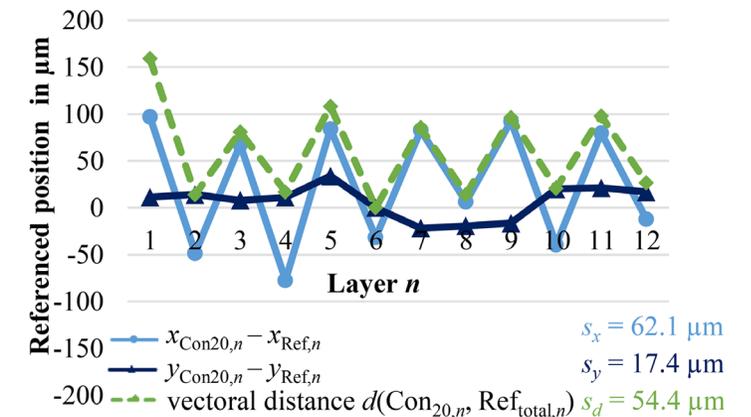


Korrektur des Kontrastes (Flat-field correction)



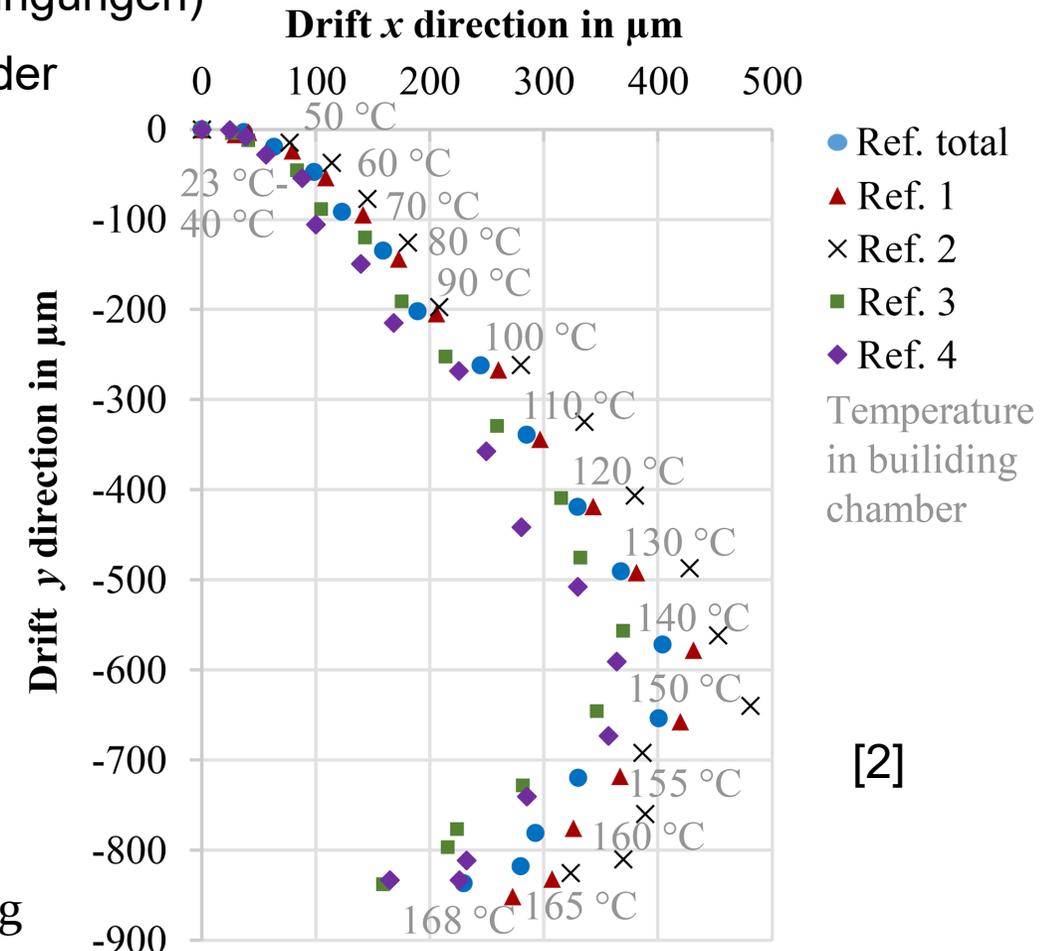
Schmelzbadposition

[2]



Übersicht zu Ergebnissen der Referenzierung

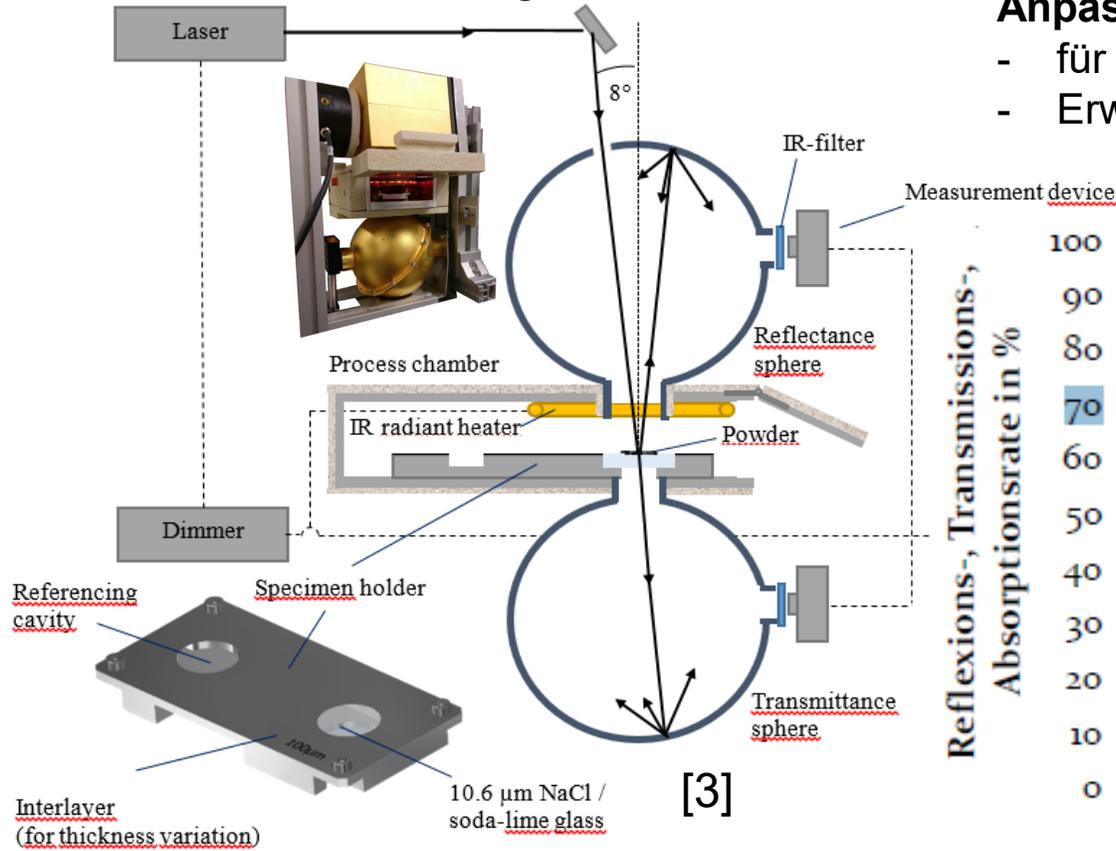
- Nachweise der Positionsstabilität der Referenzierungsrohre bzgl. Kamerasystem (bei Raumtemperatur und bei Prozessbedingungen)
- Systematischer Rakeleinflusses auf Positionsgenauigkeit der Referenzierungsrohre und des Schmelzbades
- Beurteilung der Wiederholpräzision des Scanners
- Verbesserte in situ Auswertung durch Verkürzung des Messkreises
- Veränderung der relativen Lage Kamera zu Pulverbett bei Aufheizvorgang (Einfluss des Anlagenrahmens)
- Bezugssystem zum Nachweis von lateralen Konturverlagerungen



Stabilität beim
Aufheizvorgang

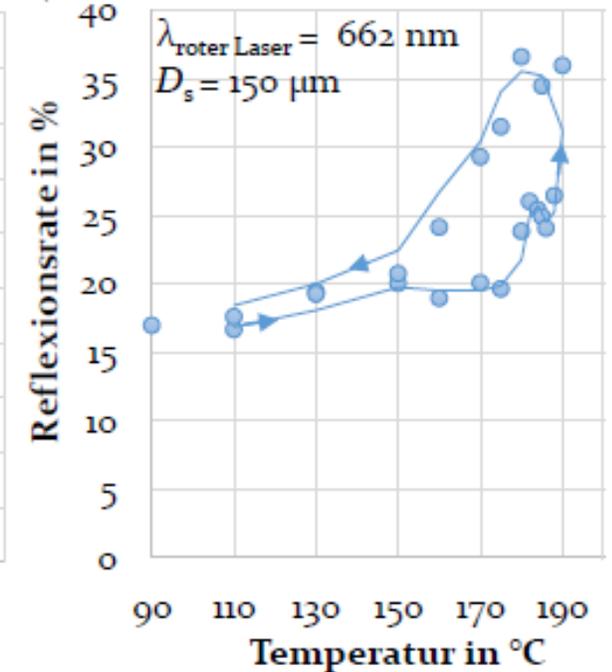
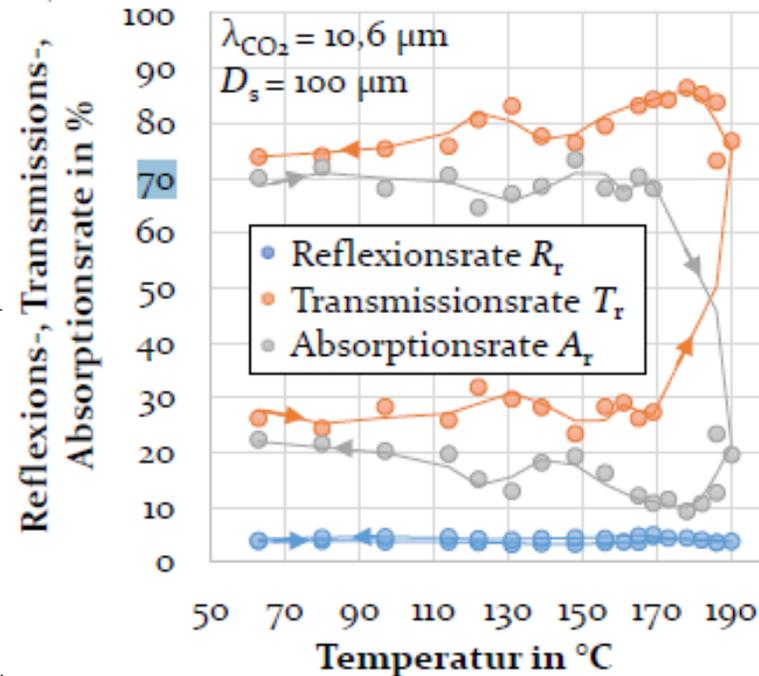
Untersuchung des Einflusses der temperaturabhängigen optischen Eigenschaften des PA12 für optisches Messsystem

Ulbricht-Kugel-Messaufbau



Anpassung des Ulbricht-Kugel-Messaufbaus von TP B6:

- für sichtbares Licht sowie
- Erweiterung um temperaturgeregelte Prozesskammer

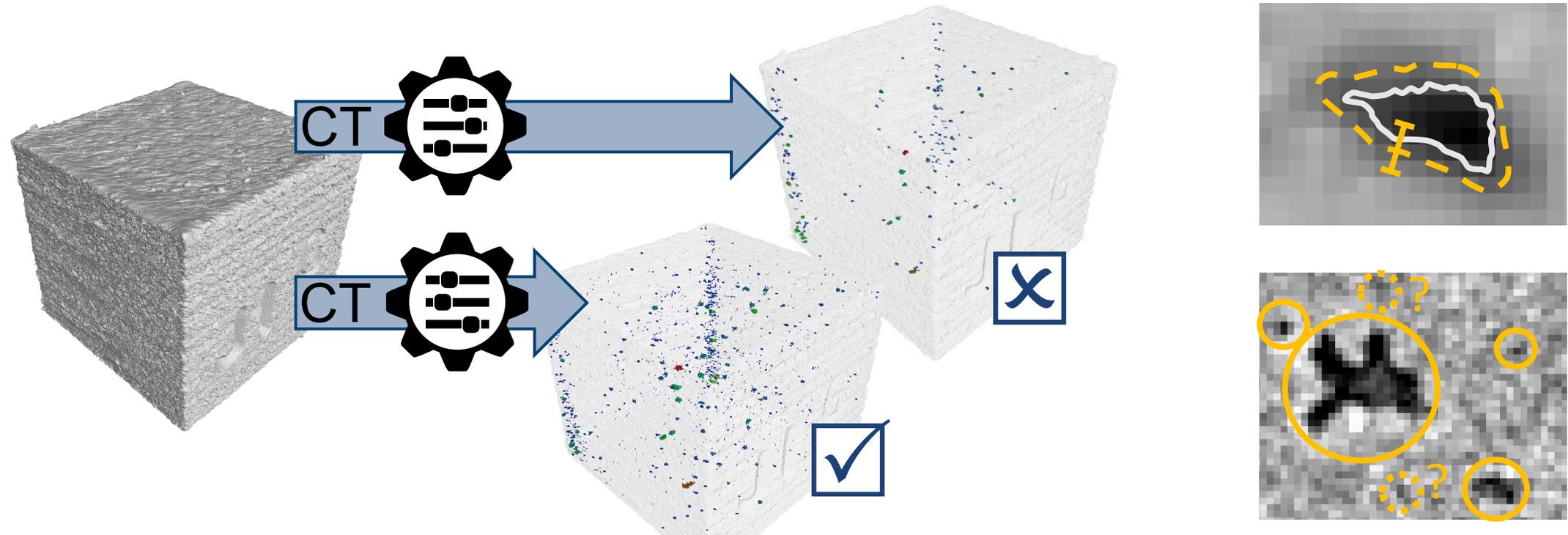


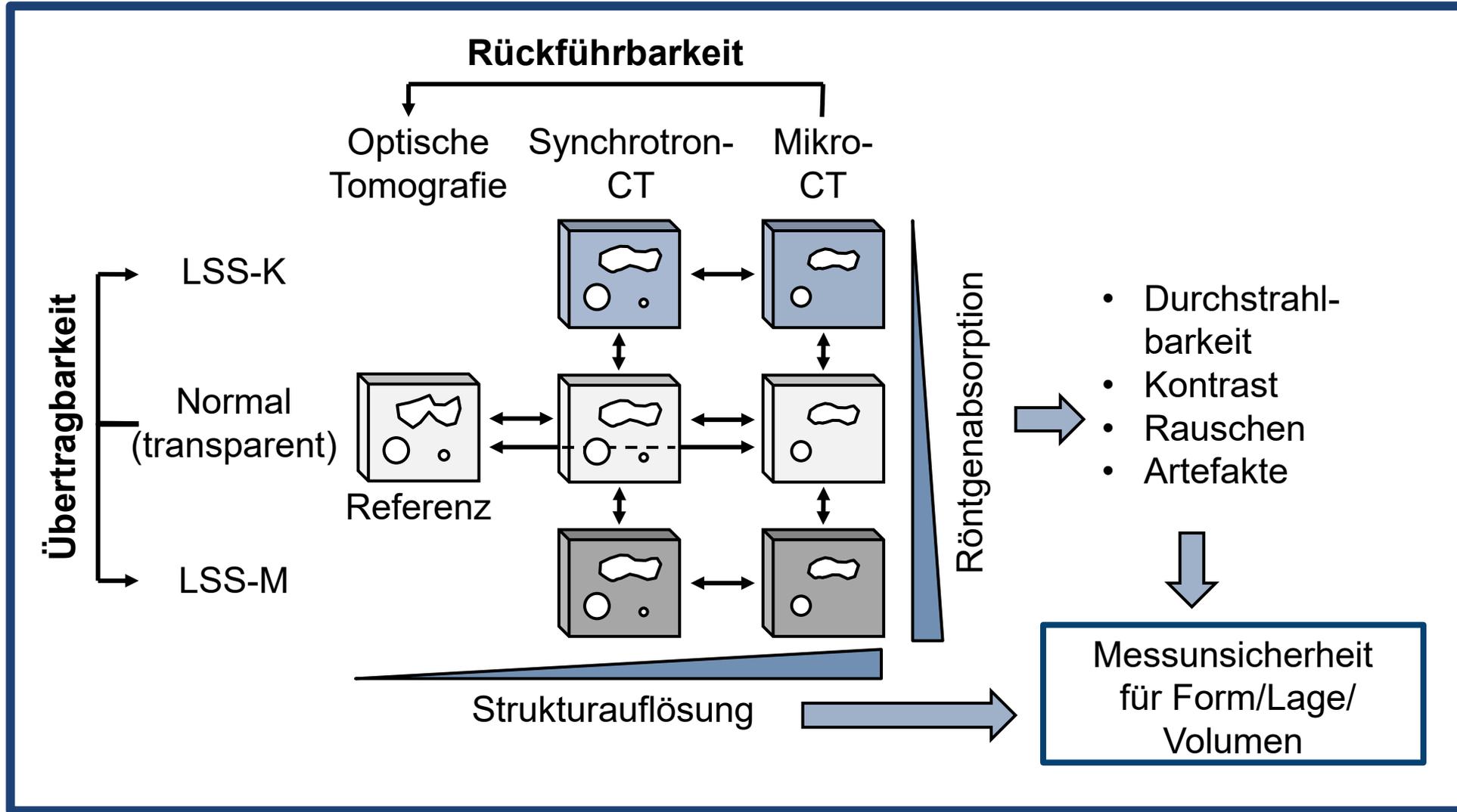
[1] Lerchen, M.: „Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung d geometrischen Produktspezifikationen“. Dissertationsschrift -Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
 [3]: Heigl, M.; Laumer, T.; Bayer, F.; Hausotte, T.: „Temperature-dependent optical material properties of polymer powders regarding in-situ measurement techniques in additive manufacturing“. In: Optical Testing Journal, Volume 65/66 (2018)

[1]

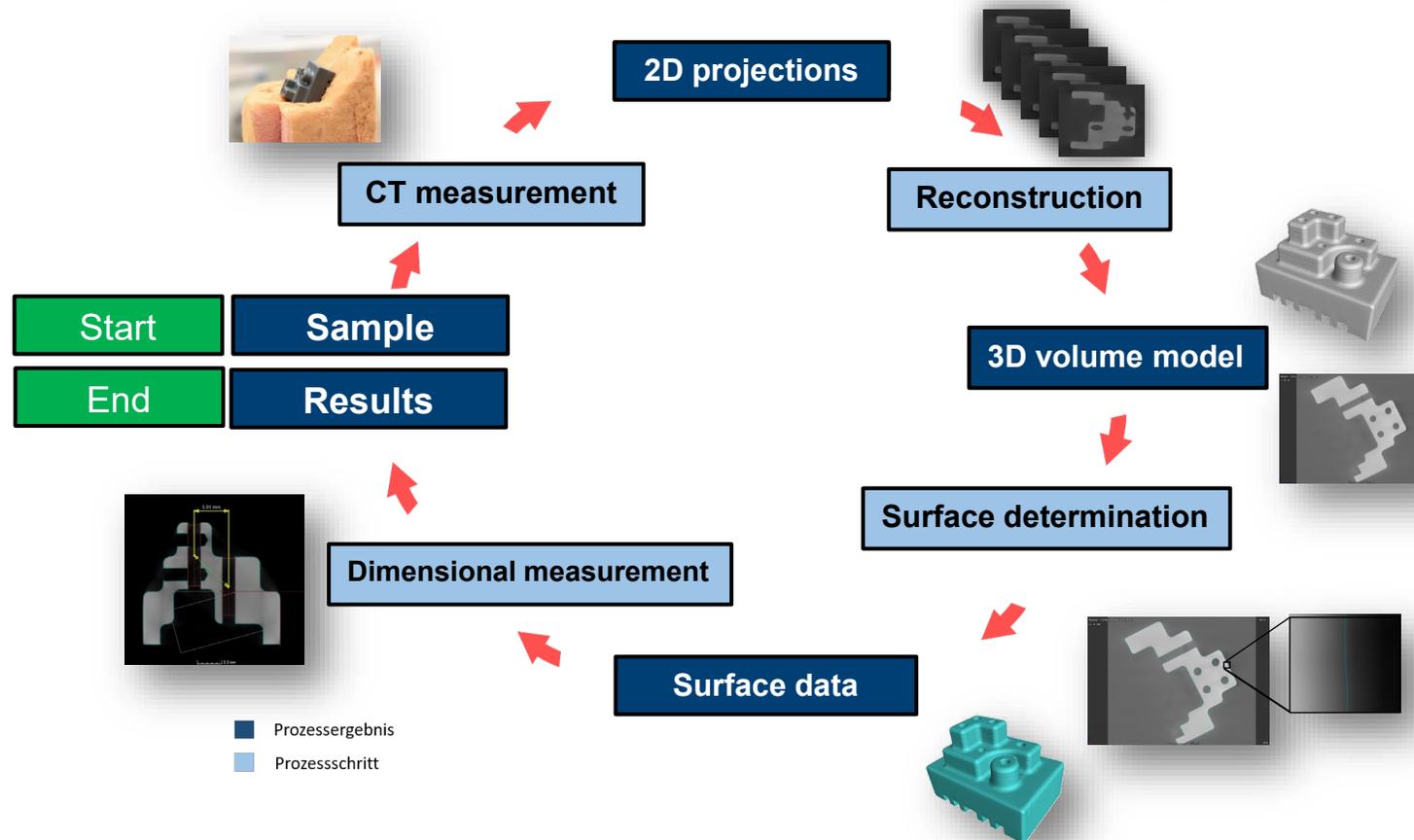
Erhöhung der Bauteilqualität

Erhöhung der Aussagekraft der Computertomografie (CT) bei der Porenmessung additiv gefertigter Bauteile durch metrologische Rückführung und Messunsicherheitsangabe





Grundprinzip der Röntgen-Computertomographie



- Rekonstruierte Röntgenbilder können mit einer Auswertesoftware als 3D-Volumen analysiert werden
- Mit Hilfe von CT-Simulationen werden 2D-Projektionen erstellt, die dann in die Messkette integriert werden.

CT-Analyse:

System: Metrotom 1500 (Zeiss)

Metrologische Evaluation (CT)

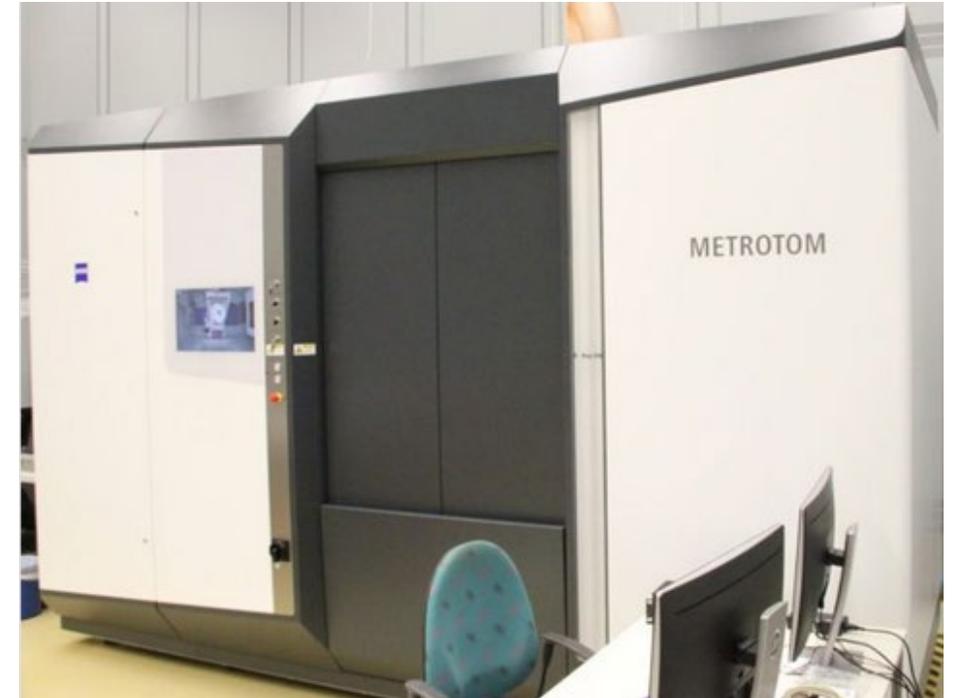
Software: VGStudio Max Version 2022.2
(VolumeGraphix)

Porositätsalgorithmen:

- VGEasyPore, VGDefX (KI-basiert)
- Only-Threshold-Methode

Alternative Porositätsmessverfahren:

- Anhand von Schliffbildern
- Elektronen-optisches Bildgebungsverfahren ELO (TP B2)
- Pyknometrie (Dichtebestimmung, DIN EN ISO 1183-3:2000-05)



Simulation Software:

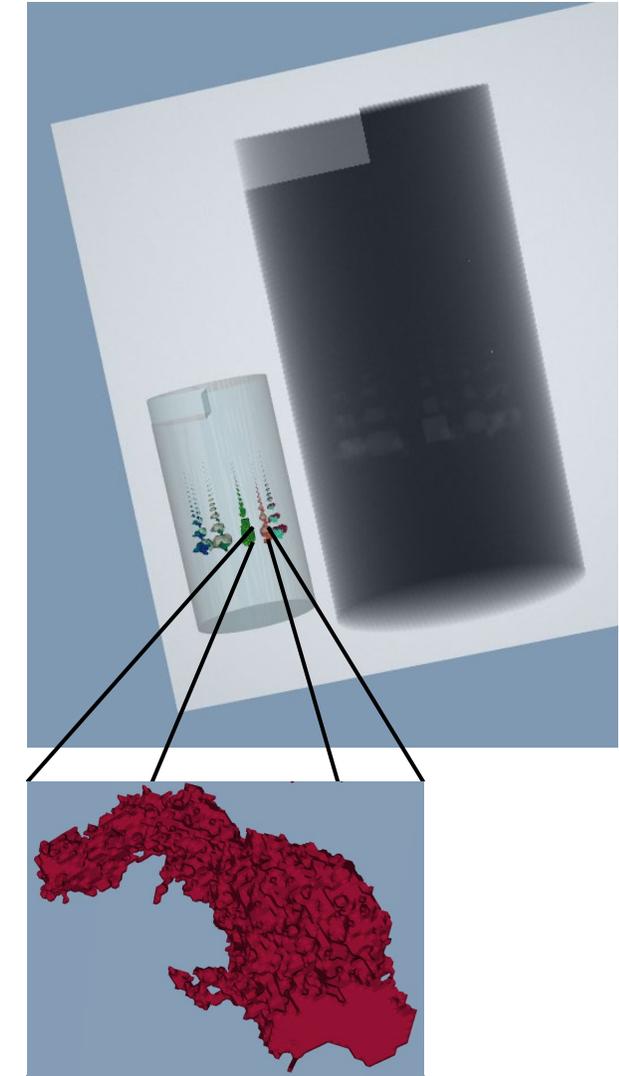
- BAM aRTist 2.10

Simulationsaufbau

- Detektor- und Quellenmodell des CT-Systems für Simulation
- Probekörper: CAD-Model
- Untersuchte Materialien: Quarzglas, Ti64 und PA12

Poreneintrag

- Für Quarzglas: Geometriedaten aus optischer Messung
- AM-Materialien: Prozessnahe Poren aus Schlifflern und Synchrotron CT
- Größen- und Formvariationen



Klassifizierung der Poren nach Snell et al. [3]

Gasporen	Ψ : 90 % bis 100 %
Keyhole	Ψ : 70 % bis 80 %
Lack-of-Fusion	Ψ : 20 % bis 60 %

Für die Simulation:

- Porenformen: Sphärizität von 20 % bis 100 %

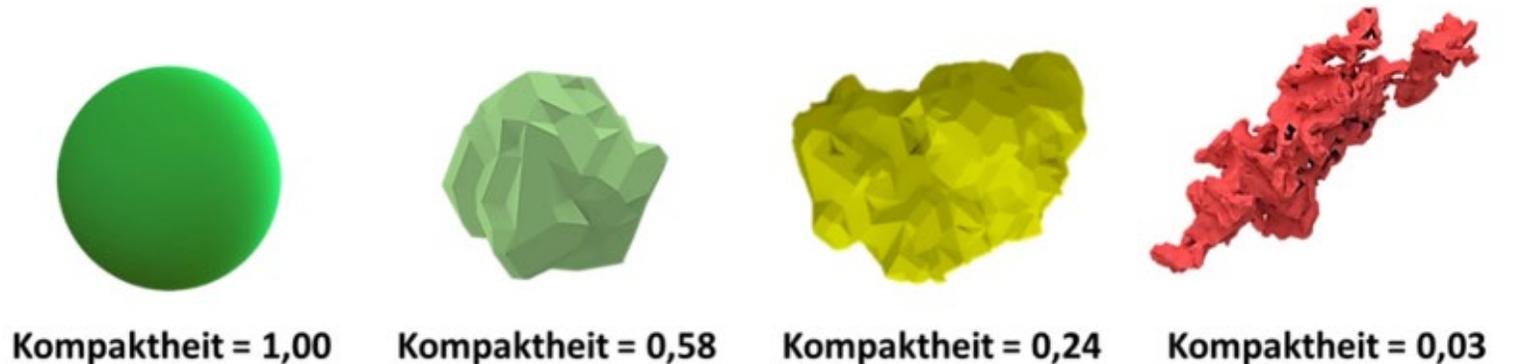
Formkriterien:

$$\Psi = \frac{A_{sphere}}{A_{detected}}$$

Oberflächenkriterium

$$C = \frac{V_{sphere}}{V_{Envelop}}$$

Volumenkriterium



[4]

[3] Snell, R.; Tammas-William, S.; Todd, I.: „Methods für Rapid Pore Classification in Metal Additive Manufacturing“. 3D Materials Science; 2019

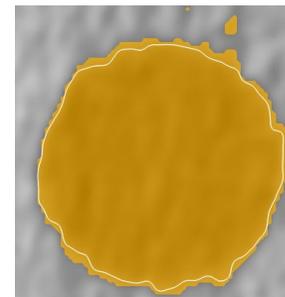
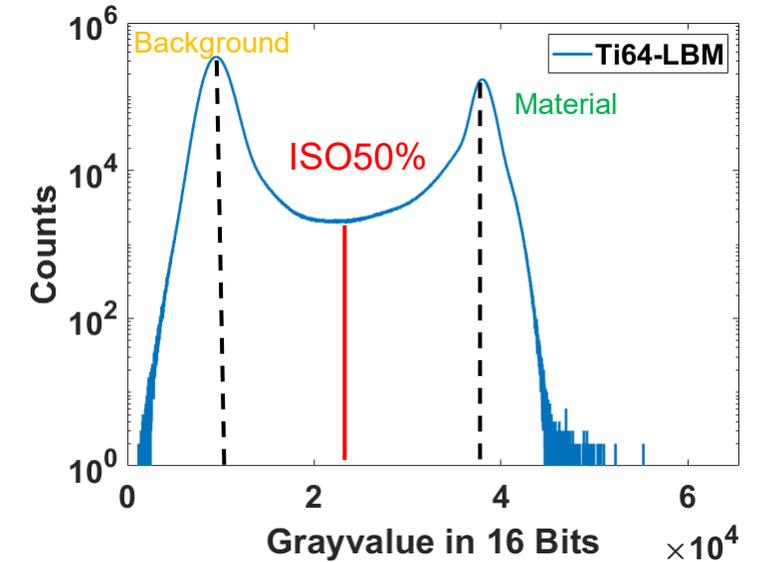
[4] BDG Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie e.V. (2019): Porositätsanalyse und Beurteilung mittels industrieller Röntgen-Computertomographie (CT), Richtlinie-P203

Oberflächenbestimmung

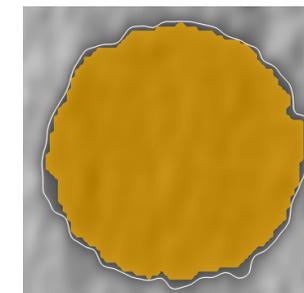
- Adaptive ISO-Wert basierte Methode (ISO50%)
- Oberflächenlinie wird anhand des Grauwertistogramms des 3D Volumendatensatz bestimmt

Schwellwertsetzung von Porositätsalgorithmen

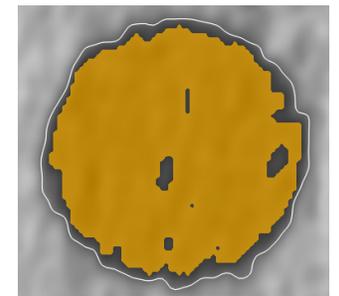
- Maximaler Porengrau soll an Oberflächenbestimmung orientiert werden [4]
- Optimierung erfolgt an einer gut erkennbaren Pore



Threshold too low



Threshold optimal



Threshold too high

- 1. Optische Referenzmessung:** Gasporen in Quarzglas
 - Bestimmung des lateralen Durchmessers von Gasporen mittels Konfokal-Mikroskopie
- 2. CT-Messung/ -Simulation:** Gasporen in Quarzglas
 - Volumenbestimmung durch Oberflächenantastung
 - Porenform
 - Einfluss von CT-Leistungsparametern auf die Form und Volumen von Gasporen
- 3. CT-Messung/-Simulation:** AM-Materialien
 - Einfluss der CT auf Porenform und Klassifizierung
 - Detektierbarkeit von Poren in Abhängigkeit der Porenform
 - Maßhaltigkeit von 2d und 3d Porositätsevaluierungsmethoden

Konventionelle Konfokal-Mikroskopie für Mikrokugeln

- Die Konfokalmikroskopie ist in der Lage Antastpunkte von Kugelgeometrien für eine Ausgleichsrechnung (Gauß-Kugel) zu ermitteln.
- Die Aufnahme einer Kugelgeometrie ist jedoch aufgrund des begrenzten Einfallswinkels des Lichtes nur nahe der Pole und nur von einem Pol einer Kugel möglich.

Neuer Ansatz:

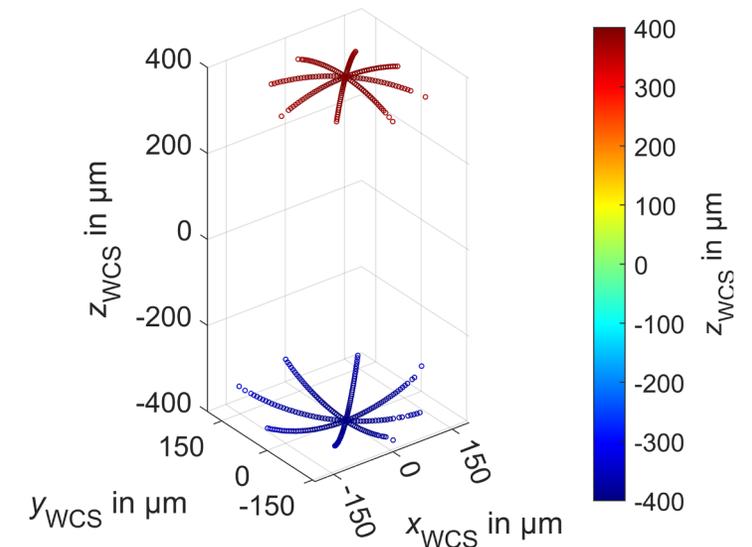
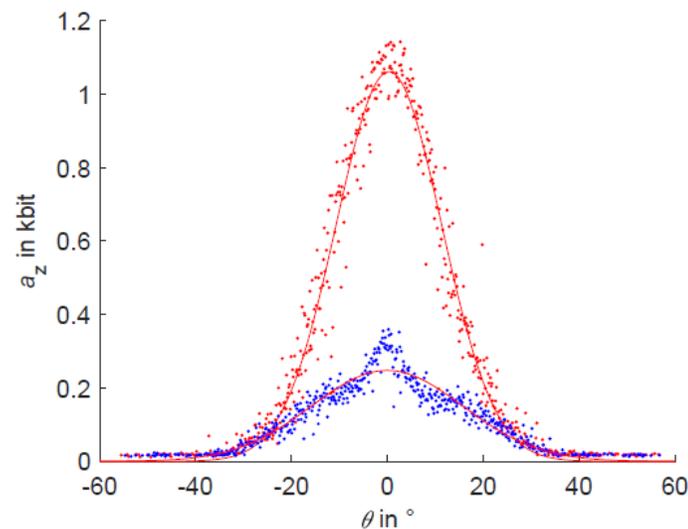
Messen der Geometrie einer Tasterkugel (400 μm Durchmesser)

- Messen der oberen Pole im Strahlengang
- Forschungsansatz: Messen der unteren Pols durch Rückseitenreflektion eines Messspiegels

[5]

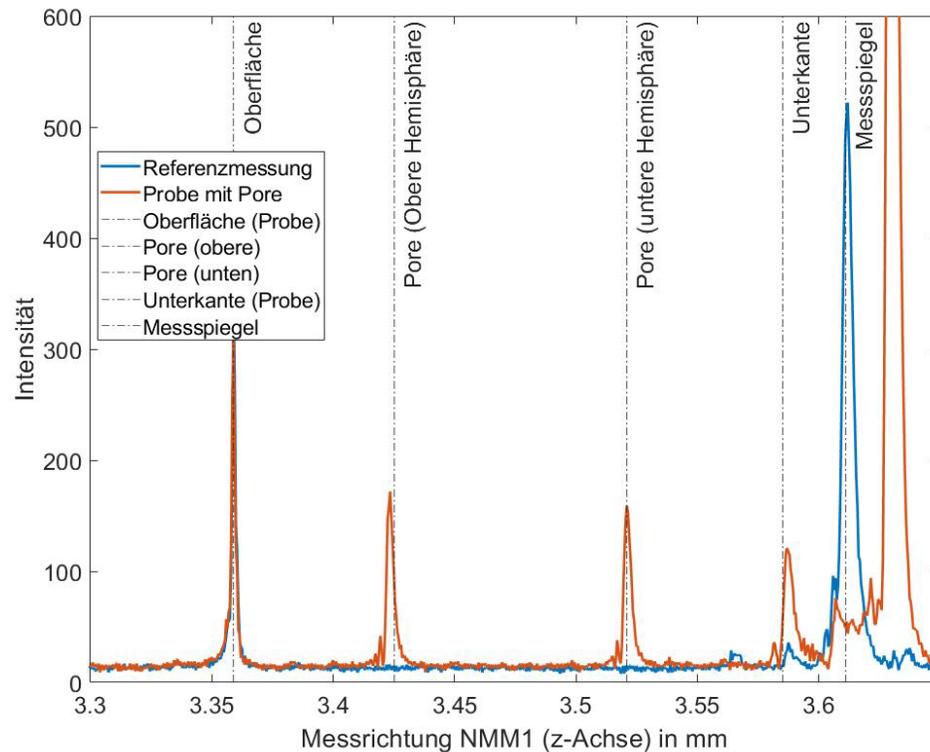


[5] Schaudé J.; Baumgärtner B.; Hausotte T.: „Mirrored confocal microscopy“. Applied Optics

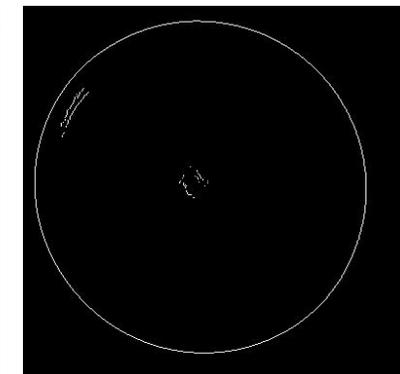
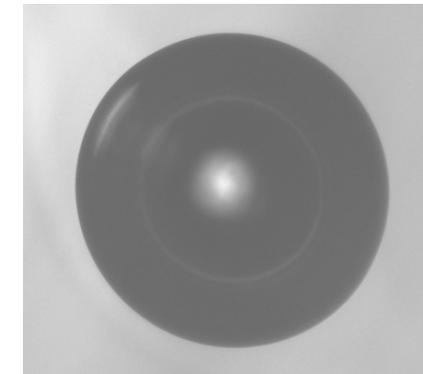
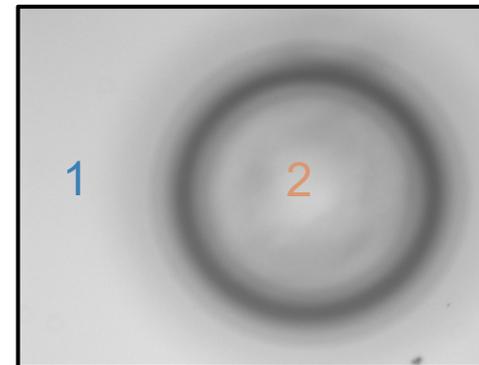


Konventionelle Konfokal-Mikroskopie für Porenkalibrierung

- Proof-of-Concept: laterale Durchmesserbestimmung Gaspore



Messpunkte:



Durchmesserbestimmung im Dunkelfeld mit Sobel-Filter zur Kantenerkennung

- Messung nur nahe der Pole möglich!
- Kombination aus lateraler und äquatorialer Durchmesserbestimmung für Größen/Volumenabschätzung möglich

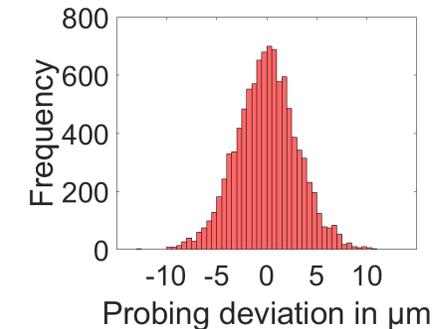
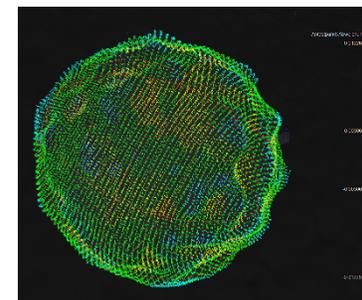
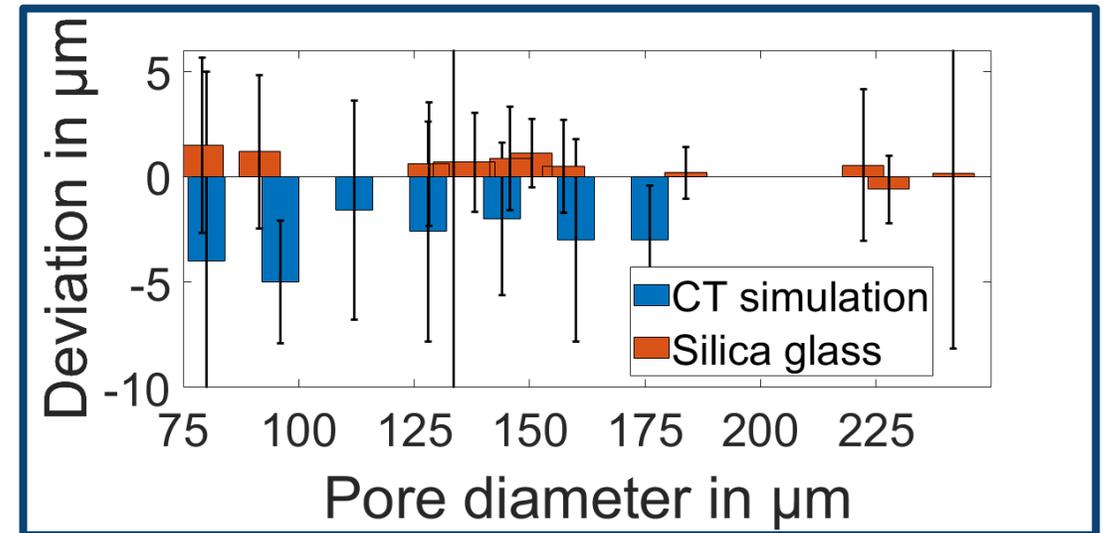
Wird durch die Oberflächenbestimmung das Porenvolumen richtig bestimmt?

CT-Simulation:

- Vergleich Gauß-Kugel-Ausgleichsrechnung mit CAD-Vorlage zeigt negativer Offset des Durchmessers (**Volumendefizit**)

CT-Messung:

- Vergleich Gauß-Kugel-Ausgleichsrechnung mit optisch bestimmten Durchmesser zeigt eine geringe Abweichung des Volumens



[6]

Gauß-Kugel-Ausgleichsrechnung

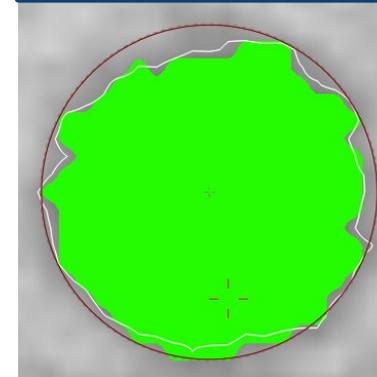
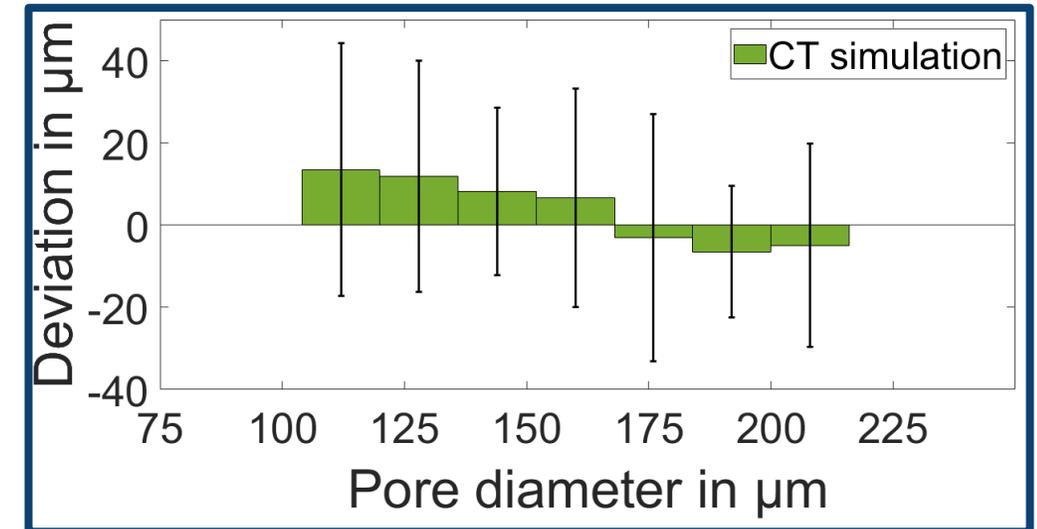
[6] Baumgärtner, B.; Hausotte, T.: „Investigation of the shape deviation of gas pores with the X-ray computed tomographie“- Sensor and Measurement Science International (SMSI 2023)-DOI: 10.5162/SMSI2023/P19

Wird durch den Porositätsalgorithmus das Porenvolumen richtig bestimmt?

CT-Simulation:

- Optimierung des Schwellwerts anhand einer Pore mit Durchmesser 180 μm
- Abweichung ist am geringsten für optimierte Pore
- Linear ansteigende Abweichung für kleiner werden Poren
- Unterschätzung für größere Poren

Ohne lokal adaptive Schwellwerte kann die Porosität nicht global abgeschätzt werden!

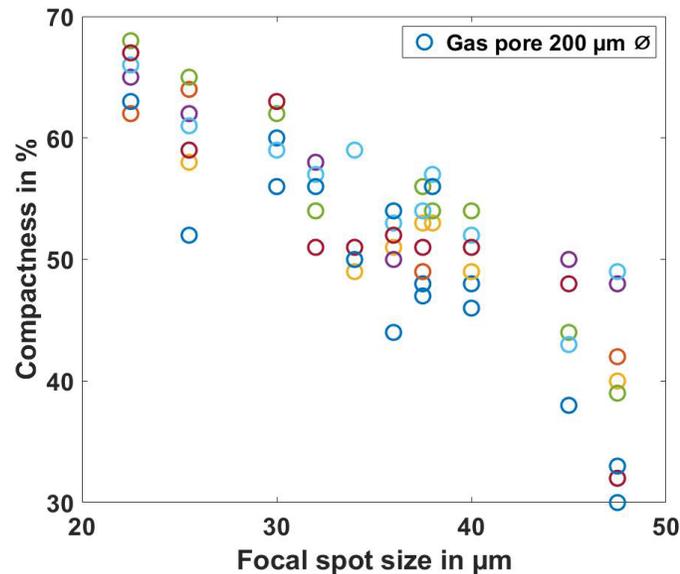


Gas pore \varnothing 180 μm

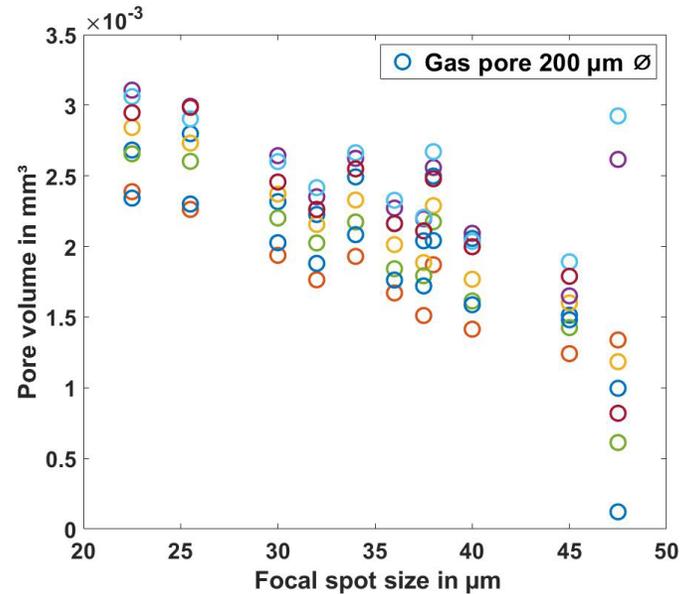
[6]

Beeinflussen CT-Parameter die Volumenbestimmung und die Formgebung von Poren?

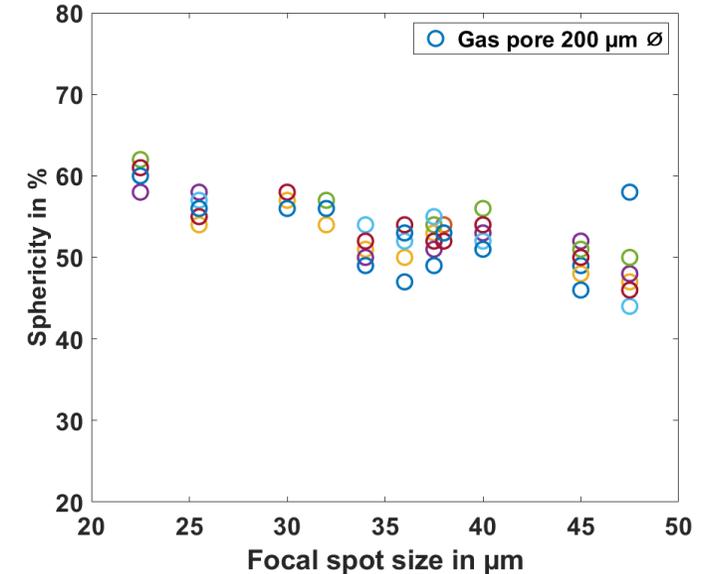
Kompaktheit



Volumen



Sphärizität



- Der Brennfleckdurchmesser (Beschleunigungsspannung in **kV** x Kathodenstrom in **μA**) erhöht mit steigender Leistung die geometrische Unschärfe
- Die Formerkennbarkeit als auch das Volumen werden dadurch beeinflusst
- **Empfehlung:** Möglichst kleiner Brennfleck zur Reduzierung der Streuung

Wie werden hochsphärische/ ideale Gasporen durch die CT/-Simulation abgebildet?

CT-Simulation:

- Gasporen erfahren einen **negativen Offset** in der Sphärizität
- Ideale Kugeln erreichen höhere Sphärizität in ideale CT-Simulation
- Einfluss von CT-Artefakten/-Rauschen

CT-Messung:

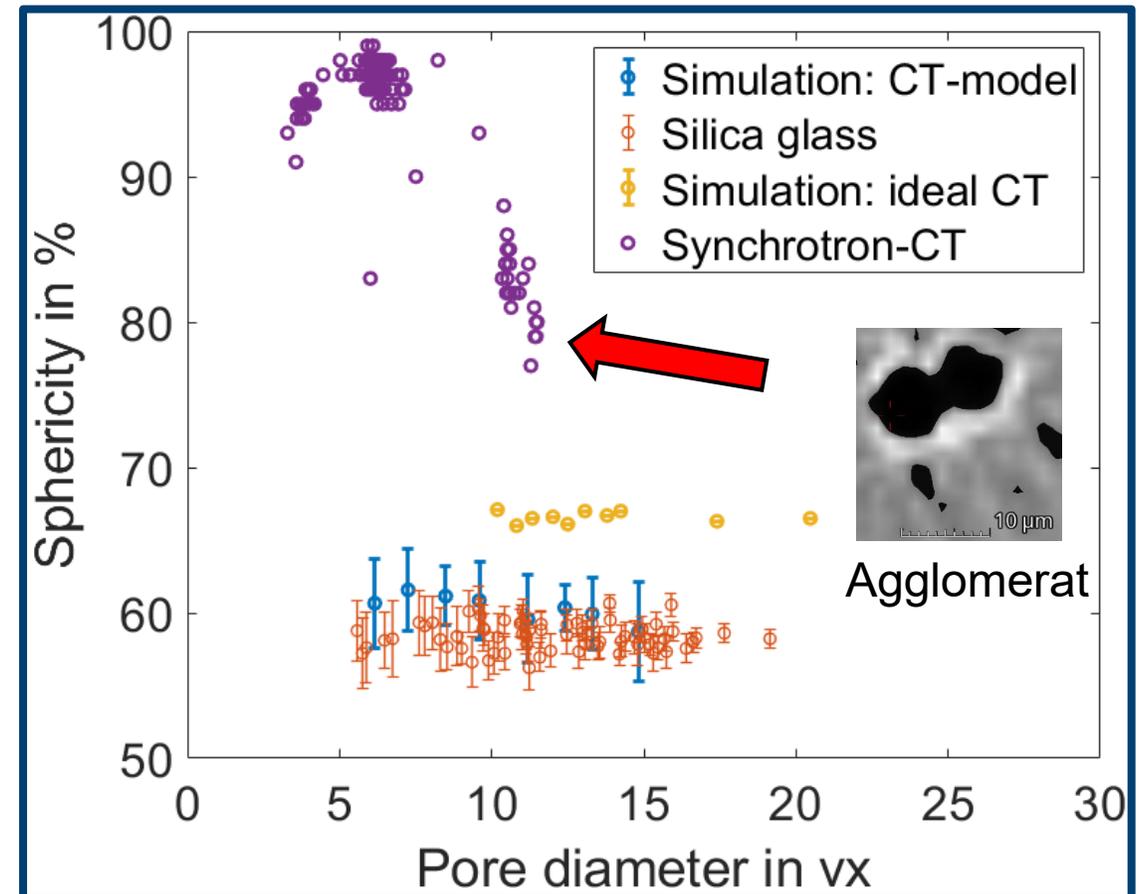
- Reale CT zeigt vergleichbares Ergebnis
- Gasporen treten mit deutlich niedriger Sphärizität auf

Synchrotron CT (Referenzmessung):

Gasporen erreichen nahezu 100 % Sphärizität

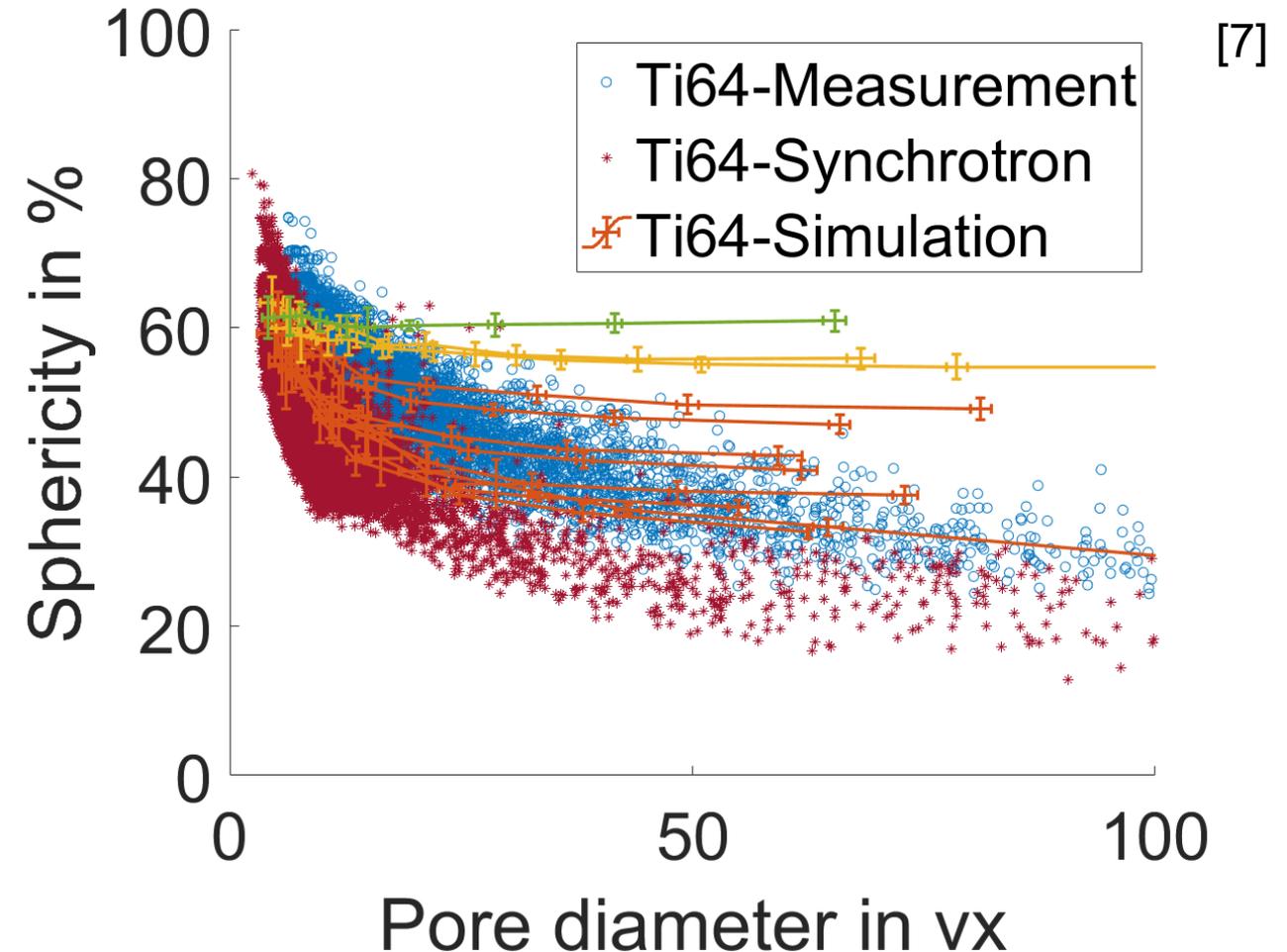
Problem:

Oberflächenabweichungen/ Formabweichungen machen eine Klassifizierung von Gasporen durch die Sphärizität schwierig



Porenformkriterium: Sphärizität Ti64

- CT-Simulation und reale Messung von Ti64 zeigen vergleichbare Porenverteilung
- Poren (CT-Simulation) zeigen Formveränderungen und Verrundungseffekte in Abhängigkeit zur Porengröße
- Sphärizitäten oberhalb von 60 % Gasporen treten in der Simulation ebenfalls auf, können aber auf Artefakte und Fehldetektionen zurückgeführt werden



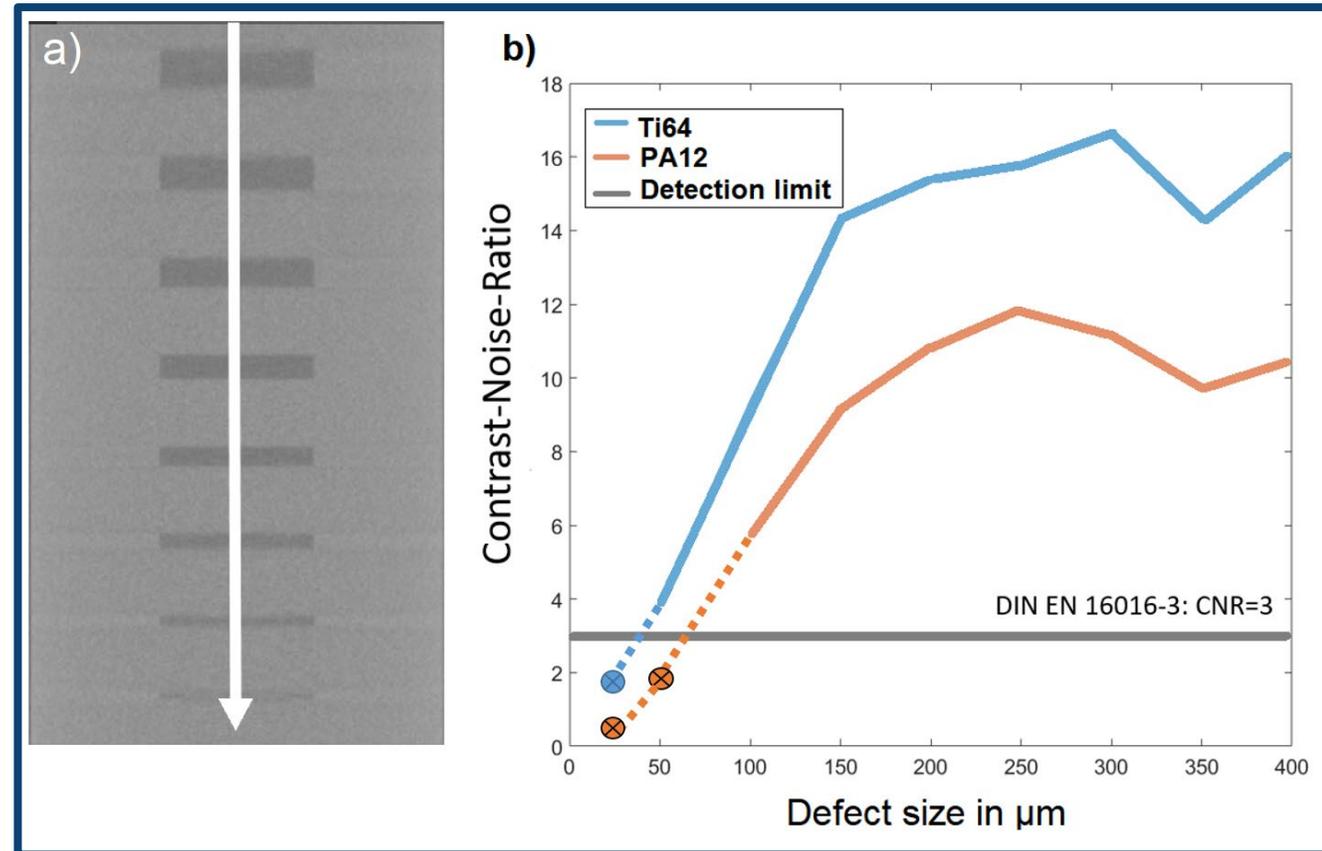
DIN EN 16016-3

- Bewertung der Detektierbarkeit mit Kontrast-Rausch-Verhältnis CNR Defekt zu Material
- Zuverlässige Detektion ab CNR= 3 gegeben

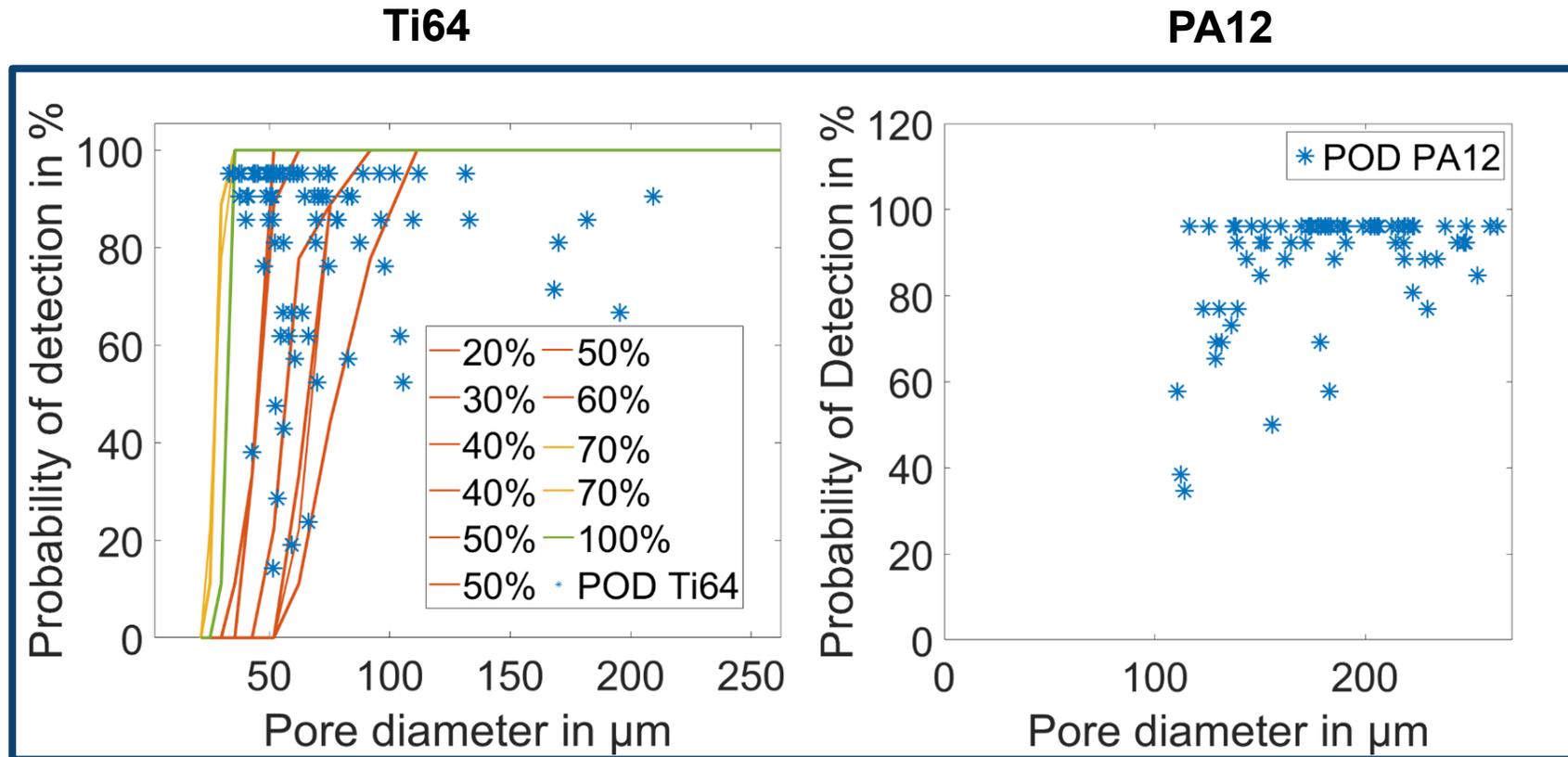
$$CNR = \frac{|\mu_{Defect} - \mu_{Material}|}{\sigma_{Material}}$$

CT-Simulation

- Quadratische Hohlräume in Ti64 und PA12 mit Durchmesser entlang Pfeil von 400 μm bis 25 μm
- Bestimmung des CNR Hohlraum- zu Materialgrauwert
- Keine Detektion für Defekte unterhalb eines CNR=3 /Gute Übereinstimmung der Aussage



Hat die Porenform eine Auswirkung auf die Detektierbarkeit von Poren?

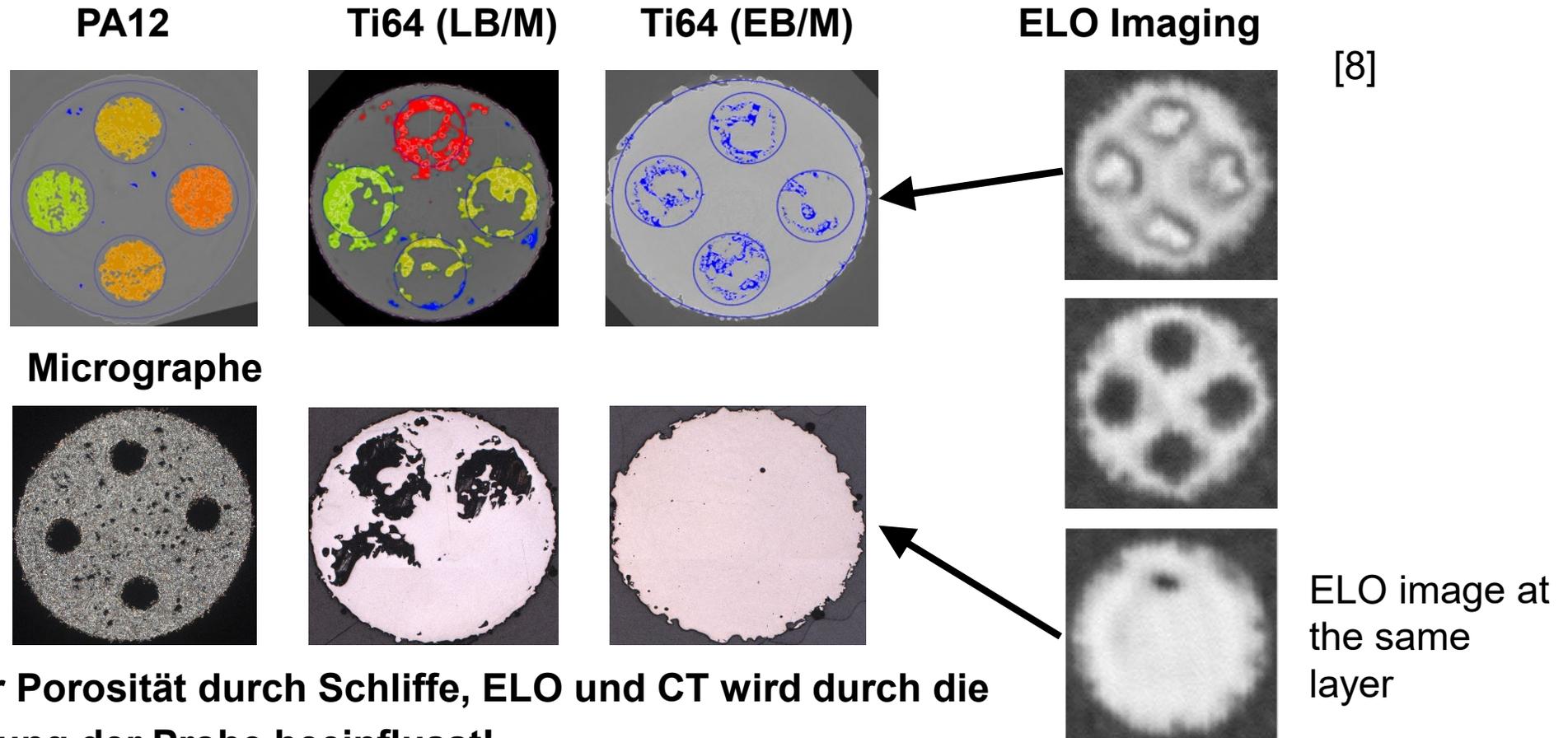


[7]

- Formabhängige Detektierbarkeit von Poren in CT-Simulation
- Desto niedriger die Sphärizität der Pore desto eher ist mit Detektionsverlust zurechnen

Wie Vergleichbar sind Porositätsalgorithmen mit alternativen Porositätsmessmethoden?

- Bestimmung der Porosität an geplanten inneren Defekten



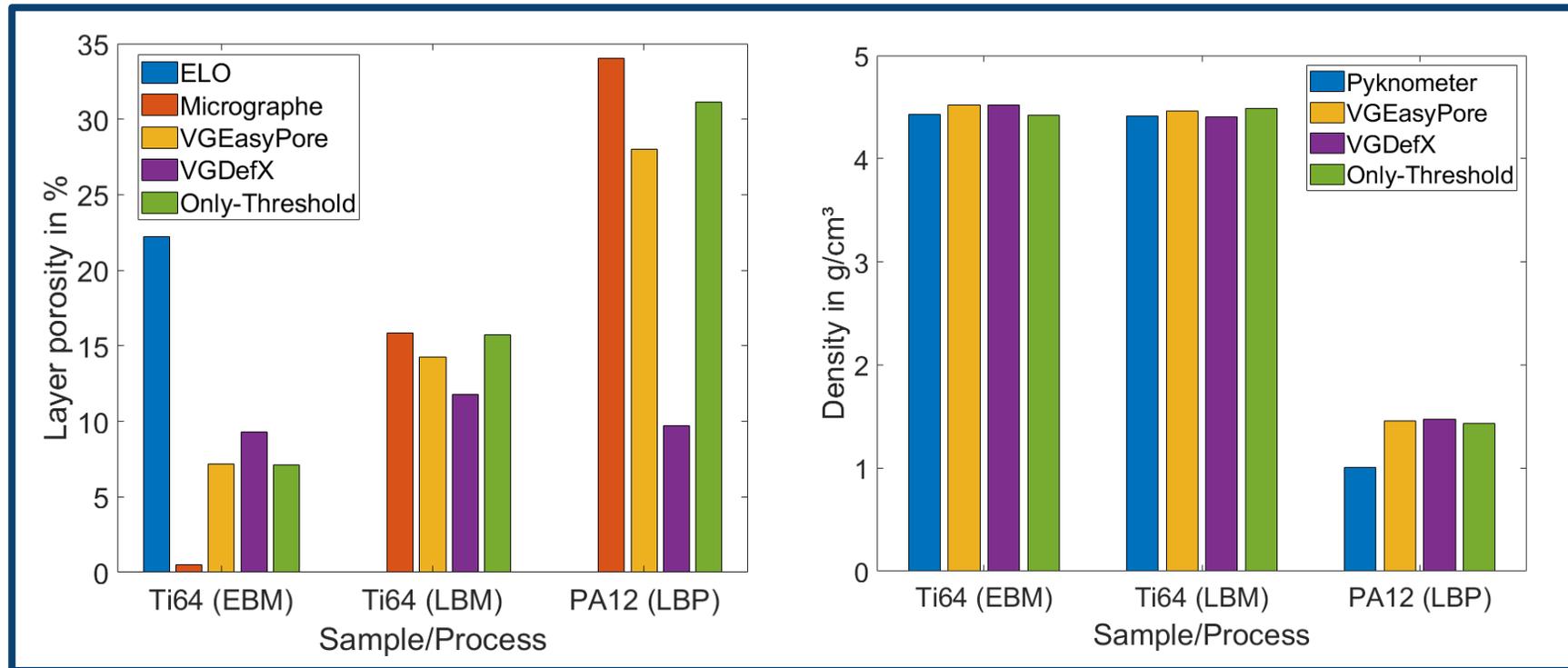
Die Bestimmung der Porosität durch Schliffe, ELO und CT wird durch die Räumliche Orientierung der Probe beeinflusst!

[8] Baumgärtner, B.; Rothfelder, R.; Greiner, S.; Breuning, C.; Renner, J.; Schmidt, M.; Drummer, D.; Körner, C.; Hausotte, T.; Markl, M.: „Evaluation of additively manufactured internal geometrical features using the x-ray computed tomography“— Journal of Manufacturing and Material Processing (JMMP)—DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp7030095>

Wie vergleichbar sind Porositätsalgorithmen mit alternativen Porositätsmessmethoden?

2d Porositätsbestimmung

Micrograph/ ELO vs. CT



[8]

- 2D: Unterschiede zwischen Porealgorithmen und 2d Evaluierungsmethoden
- Gesamt: Geringe Abweichungen bei Ti64, große Unterschiede bei PA12 (CT-kontrastabhängig)

Prüfstand zur Schichtweisen In-Line Detektion (Phase 1 und 2):

- Rakeleinfluss, Gestaltabweichung, etc.

Porositätsnormal für Gasporen

- Kalibrierung von Gasporen in Quarzglas mittels Konfokalmikroskopie möglich

Messabweichungen bei der Messung von Gasporen in Quarzglas mittels CT

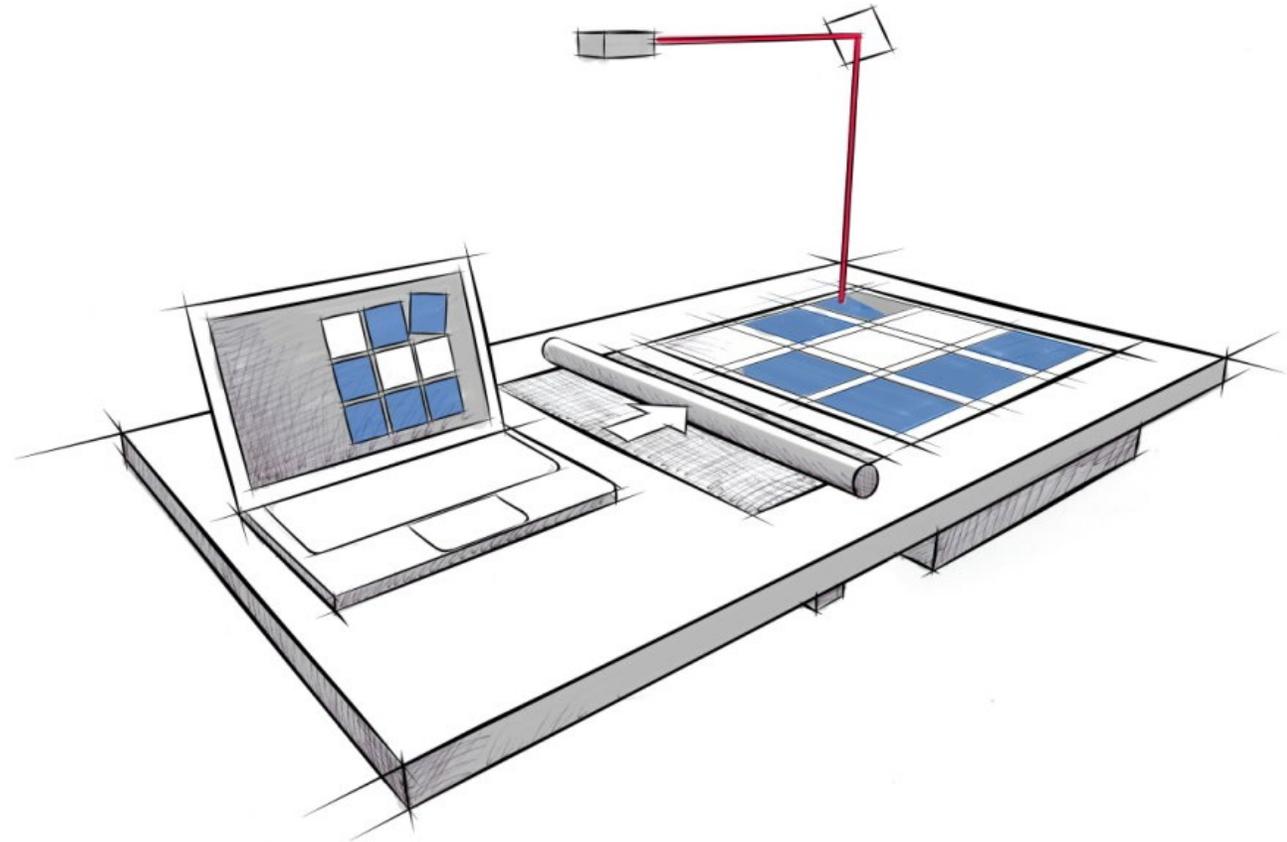
- Oberflächenfindung, Porositätsalgorithmen und Formevaluierung
- CT-Leistungsparameter

Einfluss der CT auf Poren in additiv gefertigten Bauteilen

- Form und Klassifizierung
- Detekierbarkeit

Untersuchung der Maßhaltigkeit von Porositätsalgorithmen

- zwischen 2d und 3d Evaluierungs-Methoden



vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit