

Quantitative Bestimmung von Porositätskenngrößen mittels Röntgencomputertomografie und 3D-Bildanalyse für kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Flugzeug- und Automobilbau

A. Ockert¹, A. Schmidt¹, Dr. S. Schuhmacher¹, K. Pfeffer¹, Dr. M. Keigler², R. Meier³

¹ Hochschule Aalen – Technik und Wirtschaft, Studiengang Oberflächen- und Werkstofftechnik, Beethovenstraße 1, 73430 Aalen

² C.F. Maier Europlast GmbH & Co KG, Wiesenstraße 43, 89548 Königsbrunn, ³ intelligente NDT Systems & Services GmbH, Paul-Gossen-Straße 100, 91052 Erlangen

I. EINLEITUNG

In Zeiten stetig steigender Anforderungen an die Energieeffizienz sind Gewichtseinsparungen und damit verbunden Werkstoffe mit hoher Leistungsfähigkeit gefragt. Faserverbundkunststoffe und hier insbesondere kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) zeichnen sich dadurch aus, dass ihre Struktur an die später aufzunehmenden Lasten angepasst werden kann, wodurch hohe Festigkeit bei erheblichen Gewichts- und Kosteneinsparungen realisierbar sind.

In der Industrie sind zahlreiche Herstellungsverfahren für CFK im Einsatz, von denen hauptsächlich die Autoklav- und Harzinjektionsverfahren (RTM) industriell eingesetzt werden, da durch diese höchste Bauteilfestigkeiten zu erreichen sind.

In dieser Arbeit werden die leistungsfähigen Werkzeuge zur dreidimensionalen quantitativen Charakterisierung von Porositätskennwerten in CFK-Strukturen mittels Röntgencomputertomografie und 3D-Bildanalyse entwickelt und eingesetzt.

II. ZIEL

- Herstellung der Versuchsbauteile mit künstlich eingebrachter Porosität für die nachfolgenden Untersuchungen der gezielten Schlißpräparation und Segmentierungsverfahren
- Röntgencomputertomografie der CFK-Proben.
- Verifizieren der CT-Aufnahmen mittels Schlißbild anhand der Zielpräparation und einem Vergleich eines CT-Slice mit dem entsprechenden Schlißbild
- Quantitative Bildanalyse mit statistischer Auswertung des CT-Messfehlers. Vergleich verschiedener Bildanalyseverfahren und Auswertung mit Bildbearbeitungssoftware.
- Bestimmung der Porosität mit quantitativer Aussage für verschiedene CFK-Volumenelemente.

III. VORGEHEN UND ERGEBNISSE

Geräte und Software

- Röntgencomputertomograph *phoenix|x-ray* v|tome|x s mit zwei Röntgenröhren (Mikro- und Nanofokus) mit 3D-Analys-Software VG StudioMax 2.0 von *Volume Graphics*
- Präparationsmaschine von *Streuers* RotoPol-31
- Auflichtmikroskop von Zeiss Axio Plan 2 und AxioVision 4.8 Software von *Carl Zeiss MicroImaging GmbH*

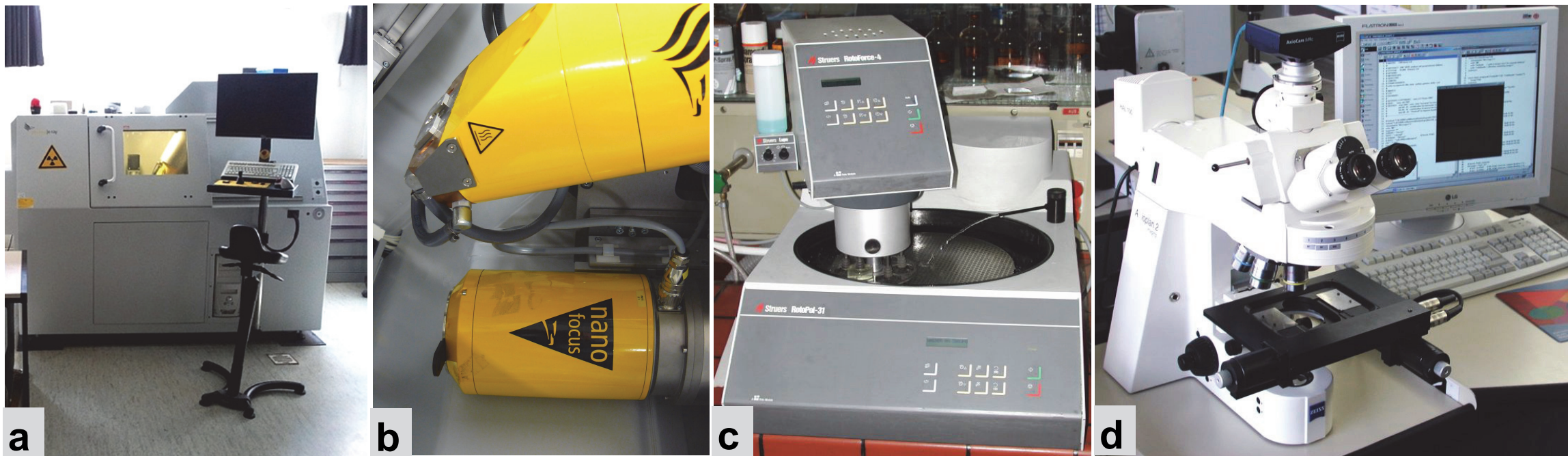


Abb. 1: Für die Untersuchungen verwendete Geräte der Hochschule Aalen: Computertomograph v|tome|x (a), Mikro- und Nanofokusröhre des Computertomographen (b), Streuers RotoPol-31 Präparationsmaschine (c) und Mikroskop Axio Plan 2 (d).

Herstellung der Versuchsbauteile und Vorbereitung der Versuchsproben

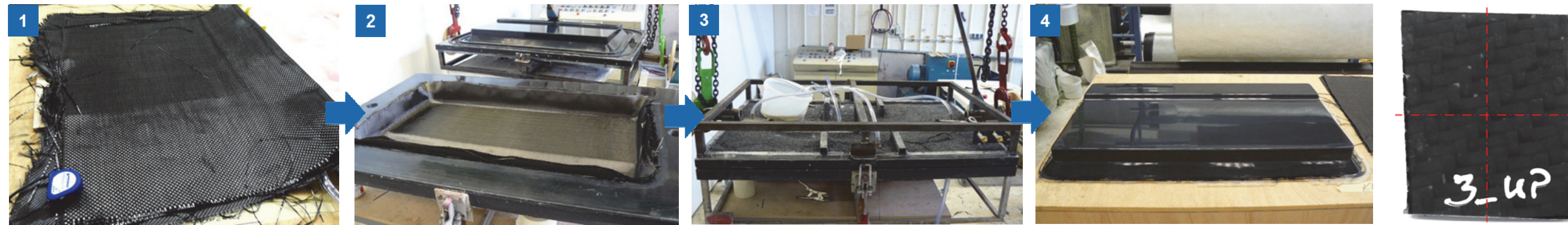


Abb. 2: Mittels RTM-Verfahren in 4 Hauptschritten (1-4) hergestellte CFK-Versuchsbauteile. Entnommene CFK-Probe (rechts).

Materialografische Zielpräparation der CFK-Proben

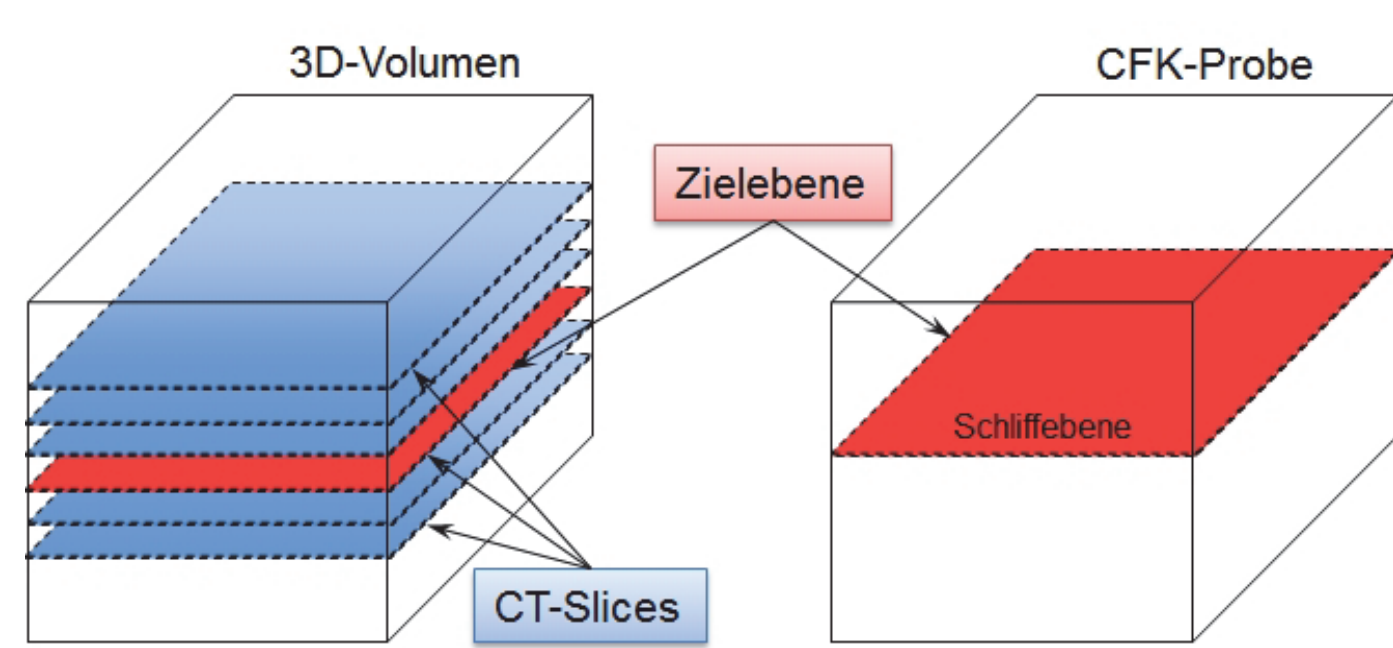


Abb. 3: Schematische Darstellung der Zielpräparation. Ein bestimmter CT-Slice wird aus dem 3D-Volumenverbund ausgewählt und auf diesen CT-Slice mit definierter Tiefenlage hin präpariert.

- Die Übereinstimmung eines Schlißbildes mit einem CT-Slice der gleichen Tiefenlage wird mit einer Genauigkeit von 5 µm erreicht.

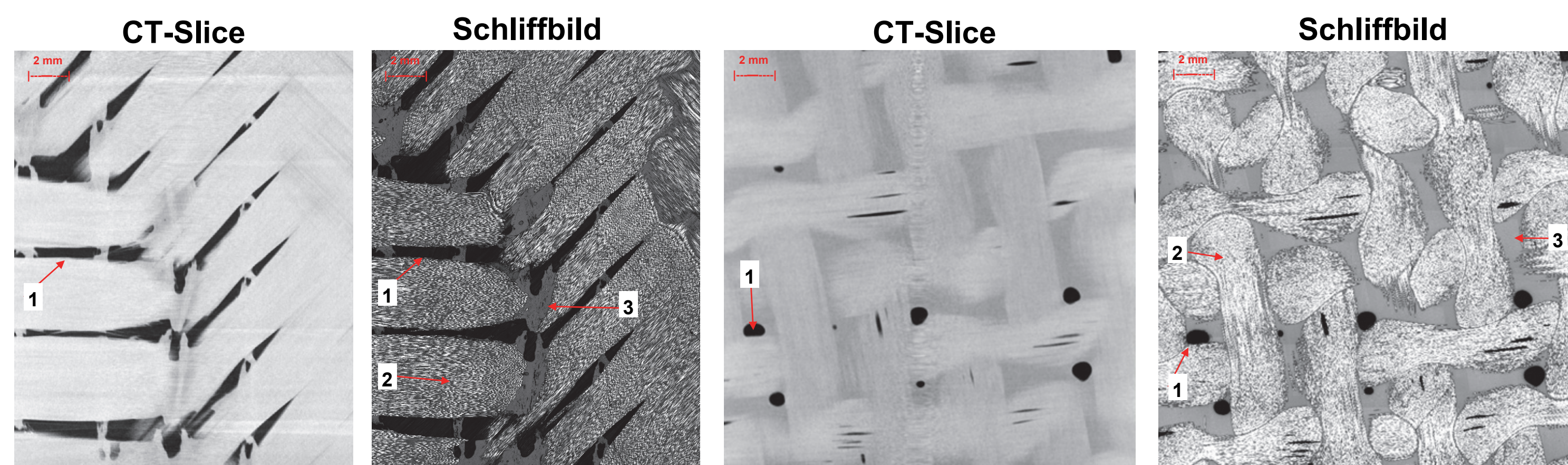


Abb. 4: CT-Slices und auf entsprechende Tiefenlage präparierte Schlißbilder unterschiedlichen CFK-Versuchsproben
1 - Porosität, 2 - Faser, 3 - Kunststoffmatrix

Segmentierung der Porosität

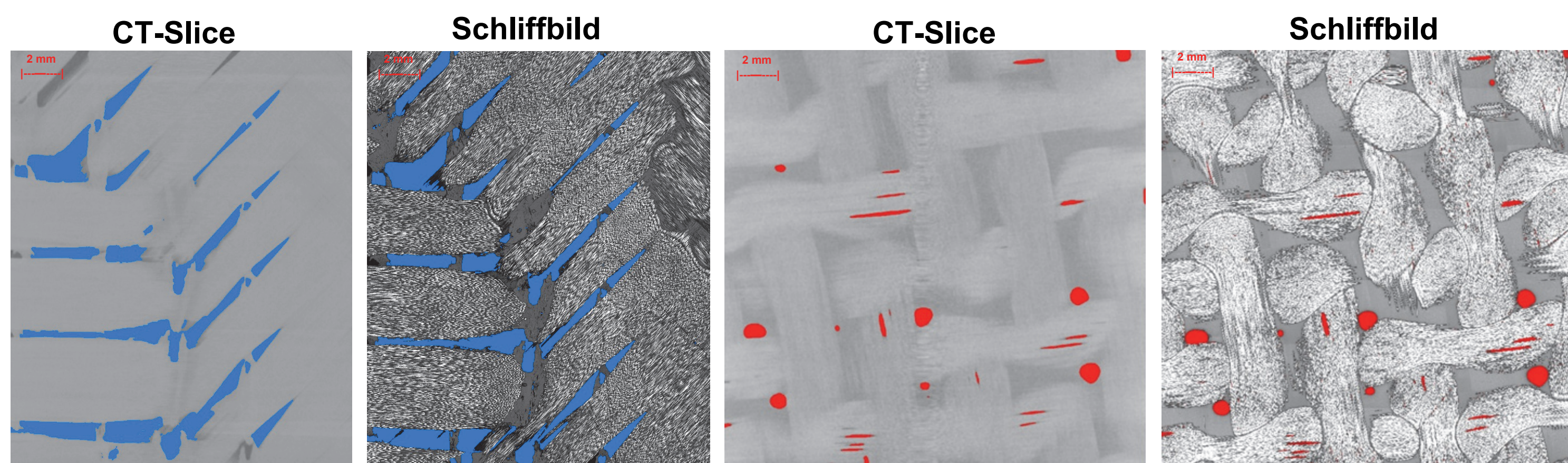


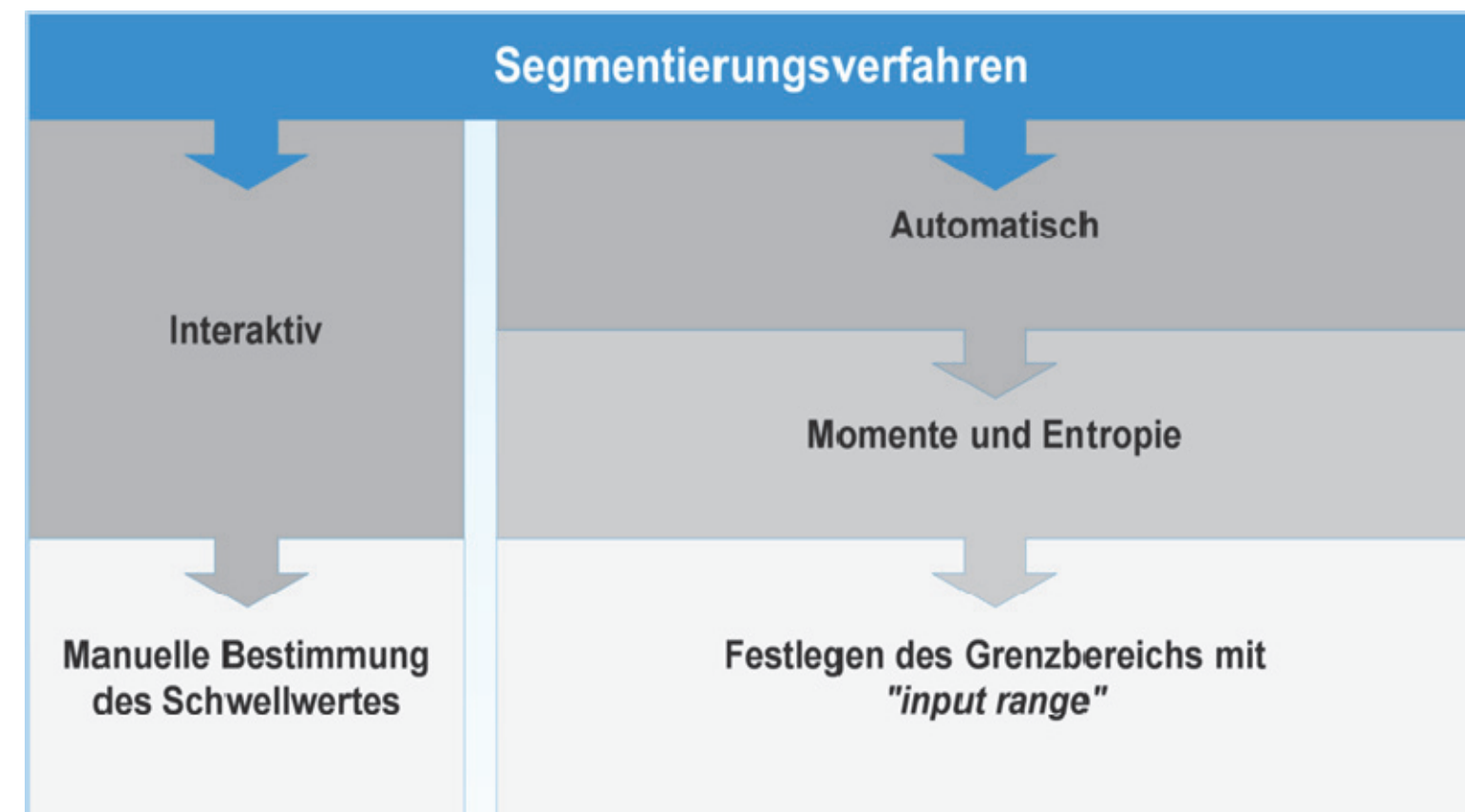
Abb. 5: Segmentierte CT-Slices und auf entsprechende Tiefenlage präparierte Schlißbilder.

Kontakt:

Andreas.Ockert@htw-aalen.de
Alexander.Schmidt@htw-aalen.de

Untersuchungen von 3 Segmentierungsverfahren

Es wurden drei verschiedene Verfahren untersucht: Interaktiv, Momenten und Entropie.



- Die segmentierte Porosität lieferte festgelegte Porenkenngrößen, die miteinander verglichen werden können.

Abb. 6: Schematische Darstellung der untersuchten Segmentierungsverfahren.

Auswertung für eine statistisch relevante Anzahl an Poren in CFK-Versuchsproben

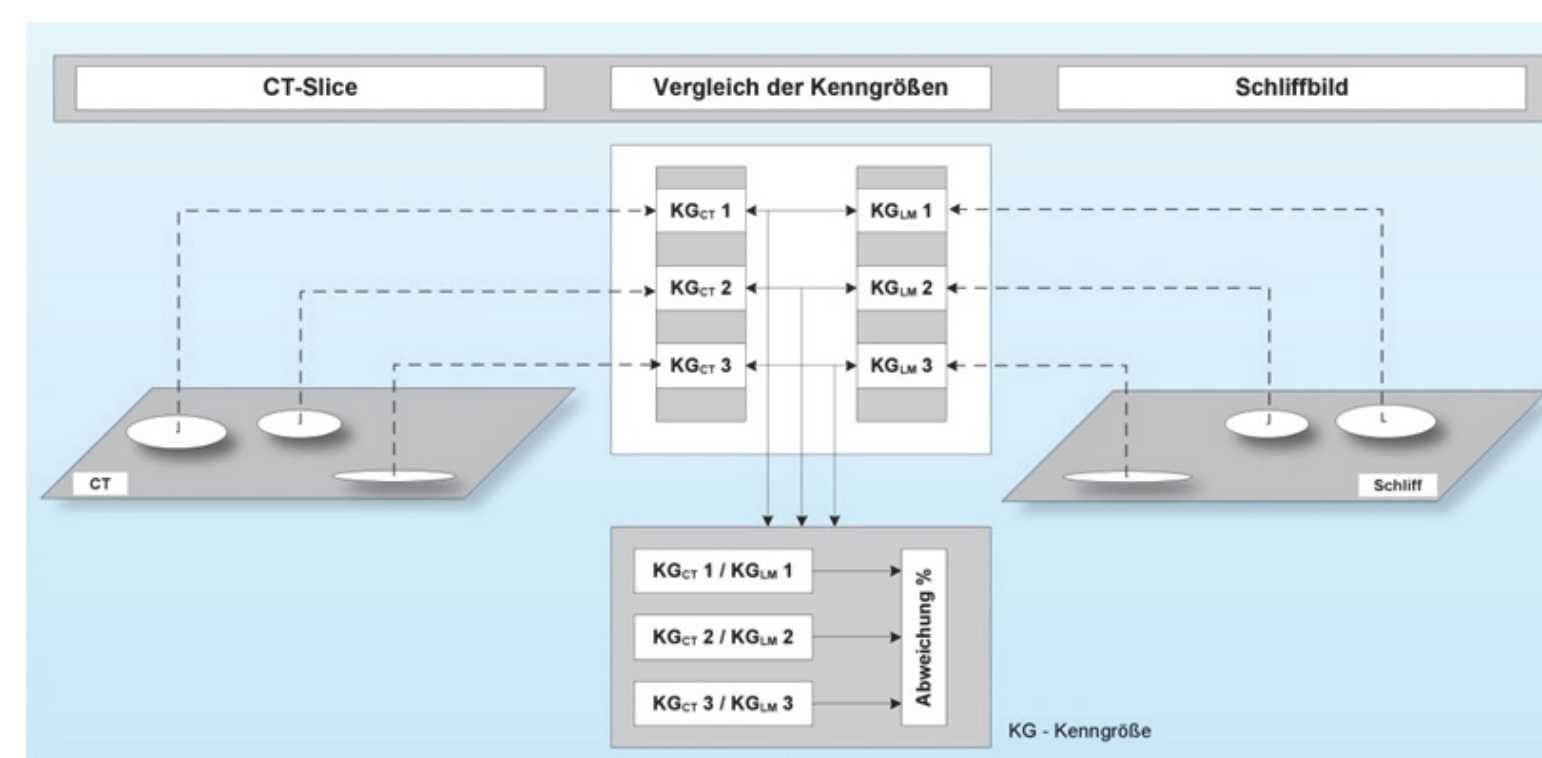


Abb. 7: Schematische Darstellung des statistischen Vergleiches für die Ermittlung der Abweichung eines CT-Bildes vom Schlißbild (Referenz).

Es wird ein statistisch relevanter Anzahl (N=90) an Poren wie folgt ausgewertet:

- Bildung des Vergleichspaars aus einer Pore im CT-Slice und derselben Pore im Schlißbild
- Bestimmung der relativen und absoluten Abweichungen für jede ermittelte Porenkenngröße
- Darstellung der relativen und absoluten Abweichungen für alle Porenkenngrößen über alle untersuchten CT-Slices

Abweichung der Porenkenngrößen von segmentierten CT-Slices und Schlißbildern für eine statistisch relevante Anzahl von Poren

N=90

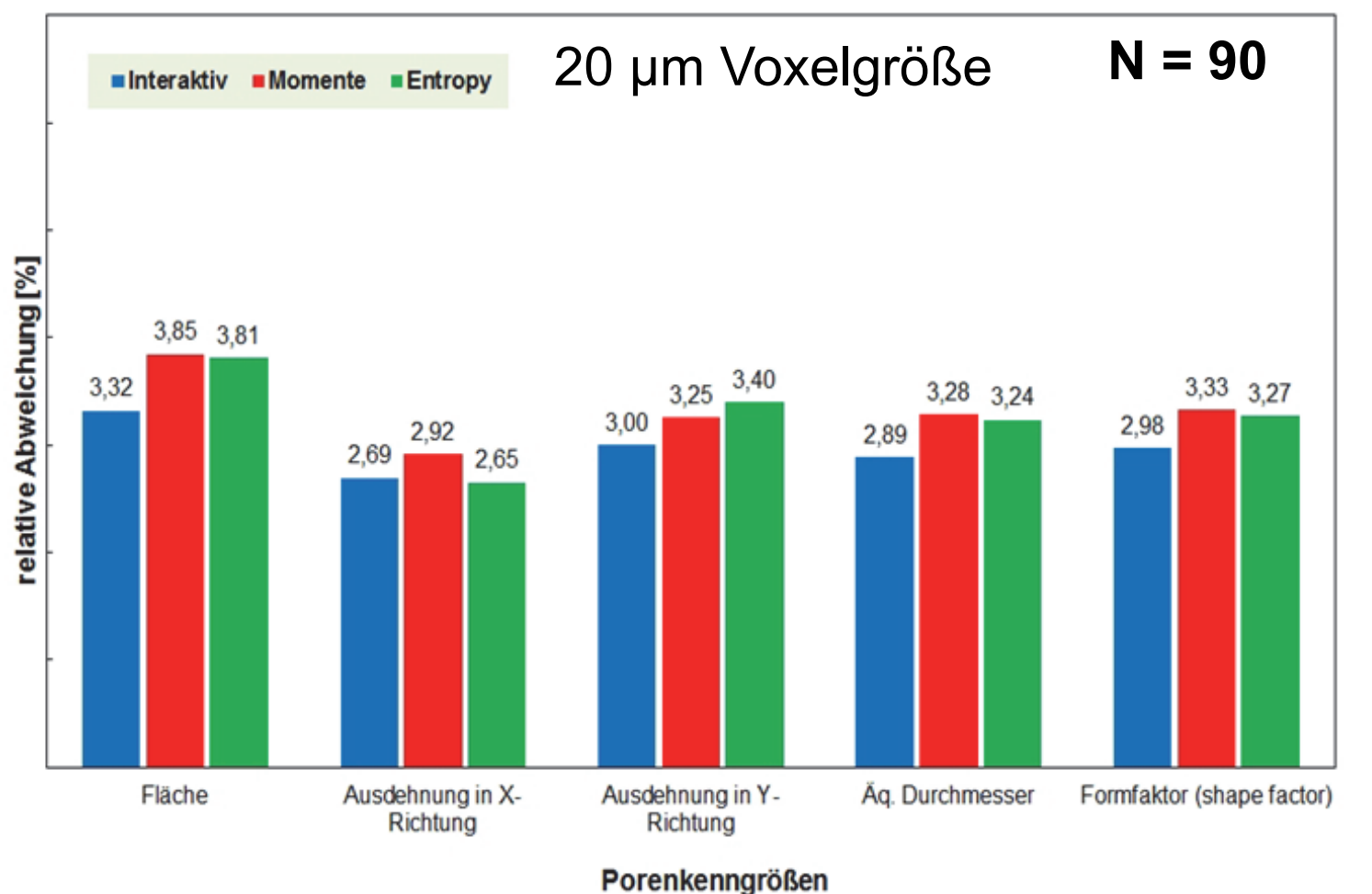
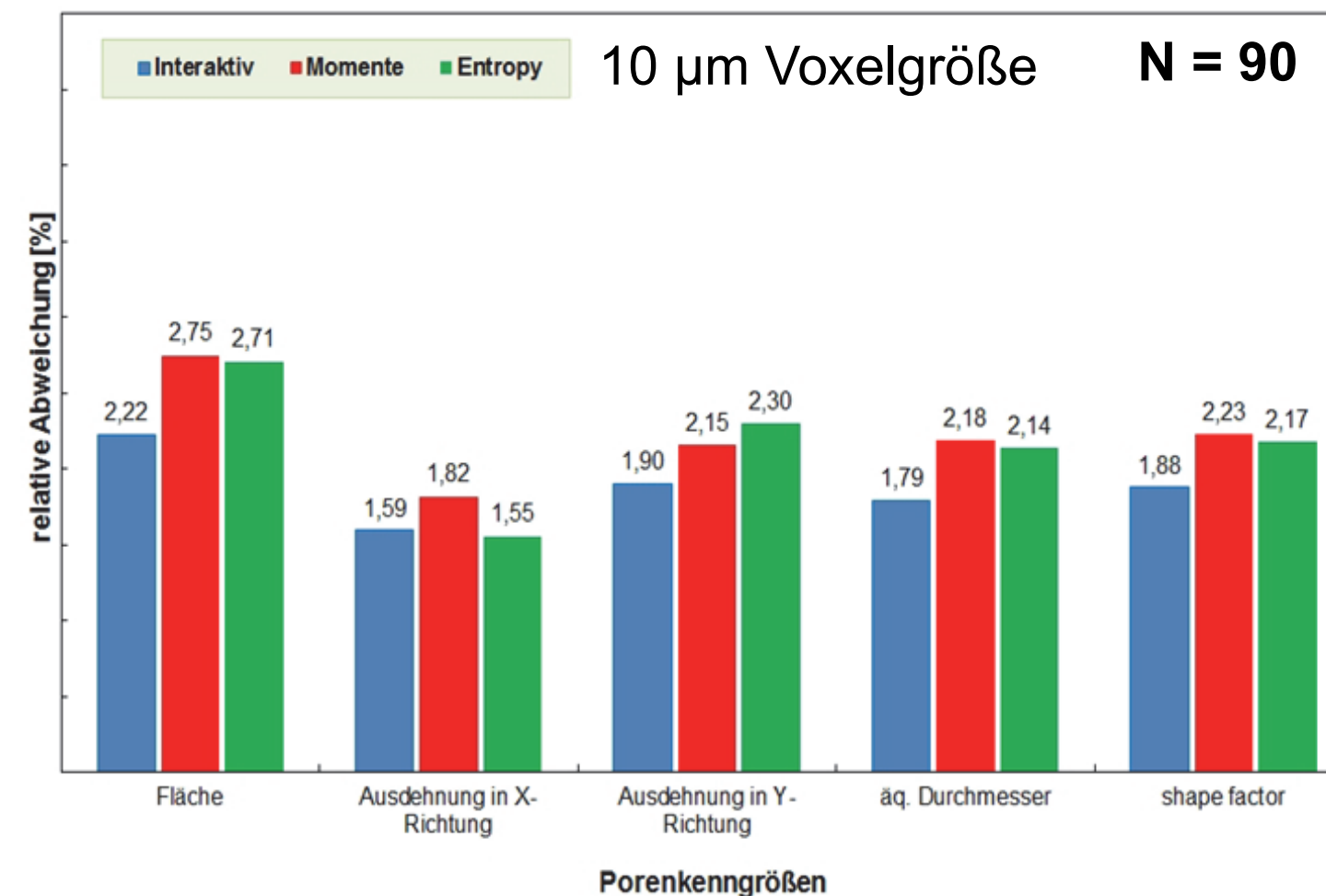


Abb. 8: Relative Abweichungen von Porositätskenngrößen aller untersuchten CT-Slices gegenüber dem Schlißbild.

ERGEBNISSE:

- CT und Schlißbilder liefern sehr gute Übereinstimmung mit einer relativen Abweichung von 2,75 % für 10 µm und 3,38 % für 20 µm Voxelgröße bei Flächenporositäten
- drei ausgewählten Verfahren liefern hervorragende Ergebnisse. Das Entropie- und Momenten-Verfahren liefern annähernd gleiche Ergebnisse bei der Segmentierung

3D-Volumenauswertung der Porositätskenngrößen in CFK-Versuchsproben mit den entwickelten Segmentierungsverfahren

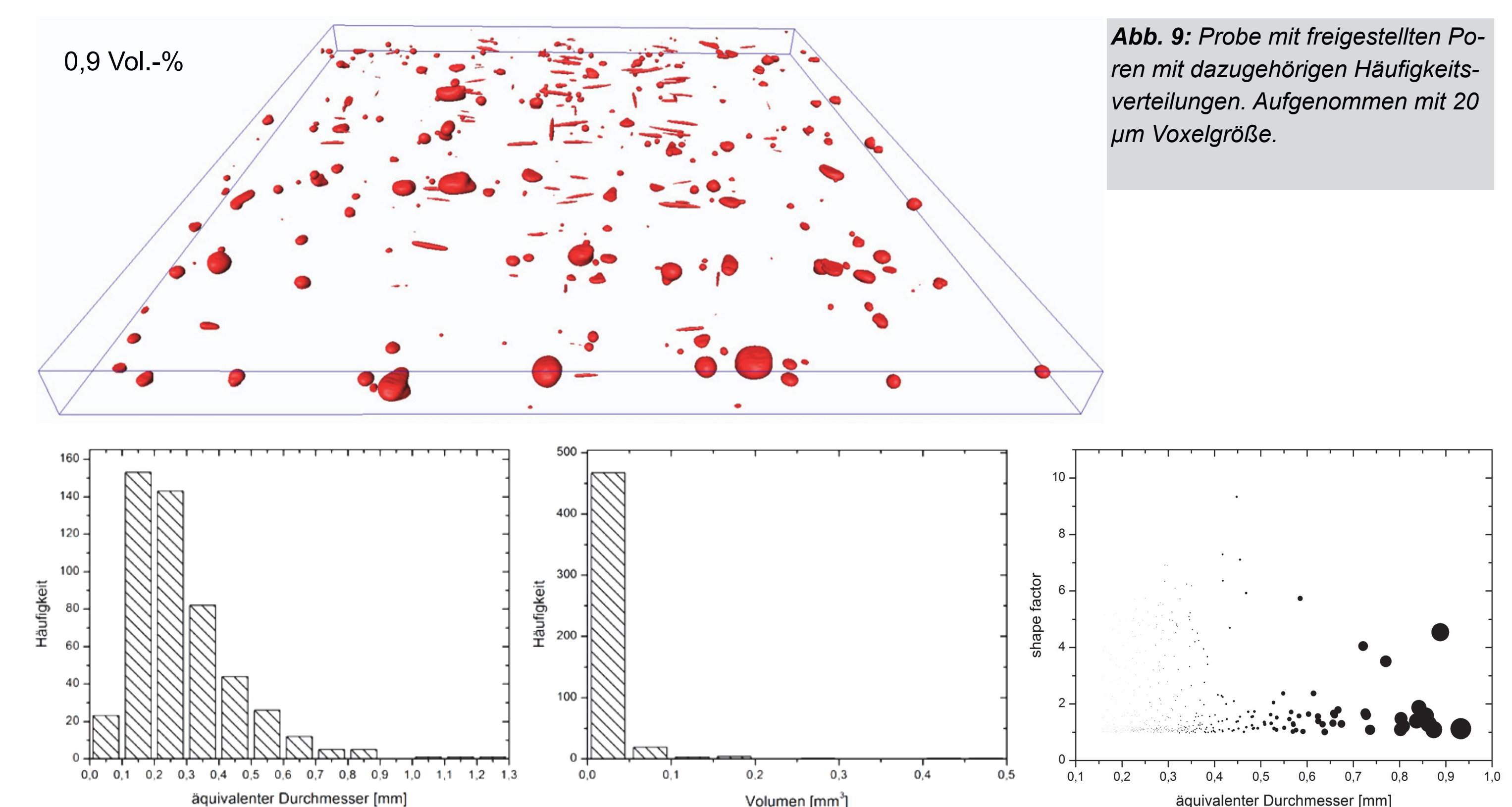


Abb. 9: Probe mit freigestellten Poren mit dazugehörigen Häufigkeitsverteilungen. Aufgenommen mit 20 µm Voxelgröße.

V. FAZIT

Die Ergebnisse zeigen, dass mit Hilfe von verschiedenen schwellenwertbasierenden Segmentierungsverfahren für die Auswertung computertomografischer Aufnahmen Porosität in CFK qualitativ und quantitativ erfasst werden kann. Die dabei angewendeten Segmentierungsmethoden ermöglichen die Charakterisierung, Vermessung und Abstimmung von Porosität in 3D-Volumen mit hoher Genauigkeit.

Die problemspezifisch angepassten Bildanalyseverfahren ermöglichen eine quantitative Beschreibung relevanter Porencharakteristika. Hierbei stand die Analyse bildmorphologischer Eigenschaften wie Struktur, längliche Ausdehnung sowie Bestimmung von Porositätskenngrößen, Porengrößenverteilung und Porenform in CFK im Mittelpunkt. Die Entwicklung von CT-basierten Verfahren zur Analyse dieser Eigenschaften schafft die Basis für die weiteren zukünftigen Untersuchungen.