

Abschlussbericht Innovatives Projekt

Projekttitel: **„Charakterisierung kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe zur Optimierung von Herstellungsprozessen und Entwicklung von Ultraschallprüfverfahren für die Fertigung“**

Antragsteller: Hochschule Aalen

Projektleiter: Prof. Dr. Silvia Schuhmacher
Tel.: 07361 576 2438 und 0176 62587679
Email: silvia.schuhmacher@htw-aalen.de

Projektteam: Prof. Dr. Silvia Schuhmacher
Dr. Georgeta Schön (geborene Radu)
Christian Fartely (Diplomand, später Doktorand)
Andreas Ockert (Bachelorand, später Projektmitarbeiter als B.Eng.)
Andreas Schmidt (Bachelorand, später Projektmitarbeiter als B.Eng.)
Sara Schuster (Bachelorandin),
Markus Reuber (studentische Hilfskraft)
Dr. Timo Bernthaler

Laufzeit: 01.01.2010 – 31.12.2011

Kontakt: Hochschule Aalen
Fakultät Maschinenbau und Werkstofftechnik
Prof. Dr. Schuhmacher
Beethovenstraße 1
73430 Aalen

Inhaltsverzeichnis

1	Projektverlauf.....	3
1.1	Projektplan mit Meilensteinen entsprechend dem Projektantrag ...	4
2	Fragestellung / Ausgangspunkt.....	5
3	Vorgehen und Ergebnisse.....	8
3.1	Vorgehen und Ergebnisse des Arbeitsblocks 1: Röntgencomputertomografie (CT) und Bildanalyse	8
3.1.1	AP 1: Beschaffung und Herstellung von CFK-Proben unterschiedlicher Porosität.....	8
3.1.1.1	<i>Probenart Gewebe</i>	<i>8</i>
3.1.1.2	<i>Probenart Gelege</i>	<i>11</i>
3.1.2	AP 2, 3 und 5: Mikro und Nano-CT an CFK-Proben hinsichtlich Porosität, Optimierung der Aufnahmeparameter	12
3.1.3	Vergleich verschiedene Voxelgrößen mit Lichtmikroskopie	18
3.1.4	AP 4: Lichtmikroskopie und Zielpräparation	19
3.1.5	AP 6: Bildanalyse und Entwicklung CT-basierter Verfahren zur quantitativen Porenanalyse an CFK	22
3.1.5.1	<i>Bildverarbeitungskette zur Bearbeitung von Bild- und Volumendaten... ..</i>	<i>23</i>
3.1.5.2	<i>Segmentierung und Vergleich der segmentierten CT-Slices mit Schliffbildern</i>	<i>23</i>
3.1.5.3	<i>Verwendete Porenkenngrößen</i>	<i>27</i>
3.1.6	AP 7: Verifizierung des entwickelten CT-basierten Verfahrens durch Vergleich mit Lichtmikroskopie	30
3.1.6.1	<i>Klassifizierung der Proben nach Porengeometrie.....</i>	<i>31</i>
3.1.6.2	<i>Relative Abweichung bei einer Voxelgröße von 10 µm</i>	<i>35</i>
3.1.6.3	<i>Relative Abweichung bei einer Voxelgröße von 20 µm</i>	<i>37</i>
3.1.6.4	<i>Quantitative Bestimmung des Porengehaltes</i>	<i>37</i>
3.2	Vorgehen und Ergebnisse des Arbeitsblocks 2: Einfluss der Prozessparameter beim RTM-Verfahren	39
3.2.1	Variation der Prozessparameter beim RTM – Prozess	39
3.2.2	Probenherstellung und Entnahme	40
3.2.3	AP 8: Einfluss der Injektionsgeschwindigkeit auf die Porosität (mikro-CT) ..	42
3.2.3.1	<i>Niedrige Injektionsgeschwindigkeit - 1,5 kg/min</i>	<i>42</i>
3.2.3.2	<i>Mittlere Injektionsgeschwindigkeit - 3,4 kg/min</i>	<i>43</i>
3.2.3.3	<i>Hohe Injektionsgeschwindigkeit - 5,5 kg/min</i>	<i>44</i>
3.2.4	Einfluss der Injektionsgeschwindigkeit auf die Porosität und das Gewebe..	45
3.2.5	AP 9: Einfluss der Werkzeugtemperatur auf die Porosität (mikro-CT)	47
3.2.5.1	<i>Höhere Temperatur: 80°C</i>	<i>47</i>
3.2.5.2	<i>Niedrige Werkzeugtemperatur</i>	<i>48</i>
3.2.6	Einfluss der Werkzeugtemperatur auf die Porosität und das Gewebe	49
3.2.7	AP 10: Einfluss des Injektionsdrucks auf die Porosität (mikro-CT)	50
3.2.7.1	<i>Niedriger Druck – 10 bar</i>	<i>51</i>
3.2.7.2	<i>Hoher Druck – 15 bar</i>	<i>52</i>
3.2.8	Einfluss des Injektionsdrucks auf die Porosität und das Gewebe	52
3.2.9	Einsatz eines Vakuums (mikro-CT)	54
3.2.9.1	<i>Injektion mit Anlegen eines Vakuums</i>	<i>54</i>

3.2.9.2	<i>Injektion ohne Vakuum</i>	55
3.2.10	Einfluss des Vakuums auf die Porosität und das Gewebe	56
3.2.11	AP 12: Injektion mit Spülphase (mikro-CT)	57
3.2.11.1	<i>Injektion mit Spülphase</i>	57
3.2.11.2	<i>Injektion ohne Spülphase</i>	58
3.2.12	Einfluss einer Spülphase auf die Porosität und das Gewebe.....	59
3.2.13	AP 13: Korrelation der ermittelten Eigenschaften mit den Prozessparameter.....	61
3.3	Vorgehen und Ergebnisse des Arbeitsblocks 3: Ultraschall und Ultraschall-Signalanalyse	62
3.3.1	Ultraschall Grundlagen	62
3.3.2	Ultraschallverfahren	63
3.3.3	Experimenteller Versuchsaufbau	66
3.3.3.1	<i>Prüfköpfe</i>	66
3.3.3.2	<i>Hardware</i>	67
3.3.3.3	<i>Software</i>	67
3.3.4	US-Untersuchungsergebnisse	67
3.3.4.1	<i>Messungen mit 5 MHz</i>	68
3.3.4.2	<i>Höherfrequente Messungen</i>	75
3.3.4.3	<i>Messung mit 15 MHz</i>	76
3.3.4.4	<i>Messung mit 10 MHz</i>	80
3.3.5	Ergebnis/ Diskussion	92
4	Wissenschaftliche Verwertung und Publikationen im Rahmen des Projektes	93
4.1	Bachelorarbeiten und weiterführende Projekte	
4.2	Posterbeitrag mit Kurzvortrag: Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung „DGZfP“ 2010, Erfurt sowie Posterbeitrag: Fachtagung „Industrielle Röntgencomputer- tomografie“ 2010, Wels/Österreich.....	944
4.3	Posterbeitrag mit Kurzvortrag: Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung „DGZfP“ 2011, Bremen	955
4.4	Foliensatz des Vortrages auf dem „3D Microstructure Meeting“, 2011, Saarbrücken	966
5	Anhang	1011

1 Projektverlauf

Das Innovative Projekt startete am 01. Januar 2010. Die mit dem Projekt erworbene Stelle konnte bereits zu diesem Zeitpunkt mit einer qualifizierten akademischen Mitarbeiterin besetzt werden. Leider schied diese allerdings bereits 9 Monate nach Projektstart wegen Mutterschutzes und Elternzeit wieder aus. Es ergaben sich hierdurch erhebliche Reibungsverluste und Zeitverzögerungen im Projekt, die allerdings durch verstärkten Einsatz der Projektleitung und der im Projekt mitarbeitenden Studierenden letztendlich wieder wettgemacht werden konnten.

Das Forschungsprojekt wurde mit den industriellen Projektpartnern C.F. Maier Europlast GmbH und intelligenteNDT System & Services als wissenschaftlicher Partner durchgeführt.

Die gesetzten Zielen und Meilensteine konnten mit leichter Zeitverzögerung erreicht werden.

Die Verwendung der erworbenen Sachmittel wurde unter anderem zur Beschaffung der Proben, Präparationsmaterialien, Verschleißteile (Targets) für den Computertomographen, Software und Hardware für die Bildverarbeitung, Verbrauchsmaterialien und Tagungsreisen eingesetzt.

1.1 Projektplan mit Meilensteinen entsprechend dem Projektantrag

Nr.	Projektteil	Jahr 1				Jahr 2			
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
1	Röntgencomputertomographie (CT) und Bildanalyse								
AP1	Beschaffung von CFK-Proben definierter Eigenschaften								
AP2	Mikro-CT an CFK-Proben hins. Porosität								
AP3	Nano-CT und LM an CFK-Proben hins. strukt. Eigenschaften								
AP4	Lichtmikroskopie (LM) und 2D-Bildanalyse								
AP5	Opt. der CT-Aufnahmeparameter bez. Kontrast & Auflösung								
AP6	Entw. CT-bas. Verfahren zur quantitativen Porenanalyse an CFK								
AP7	Vergleich CT-basierter mit LM-basierter Porositätsanalyse								
2	Einfluss der Prozessparameter beim HPRTM								
AP8	Einfluss der Injektionsgeschwindigkeit								
AP9	Einfluss der Werkzeugtemperatur								
AP10	Einfluss des Injektionsdrucks								
AP11	Korrelation ermittelter Eigenschaften mit den Prozessparametern								
3	Ultraschall (US) und Ultraschall-Signalanalyse								
AP12	Analyse experimenteller und theoretischer Ansätze								
AP13	Aufbau US-Messverfahren, Signalanalyse, systemat. Auswertung								
AP14	Einsatz elektronisch steuerbarer Schallfelder								
AP15	Einfl. der CFK-Strukturen auf US-Ausbreitung und -Messgrößen								
AP16	Einfluss geometrischer Eigenschaften der CFK-Proben								
AP17	Methoden zur Minimierung störender Einflüsse								
AP18	Grunlagen zur Entwicklung eines Verfahrens zur US-basierten Porositätsanalyse an CFK								
Berichte und Meilensteine		M1				M2			
Halbjährlich: M1 bis M4		◇				◇			

2 Fragestellung / Ausgangspunkt

In Zeiten stetig steigender Anforderungen an die Energieeffizienz sind Gewichtseinsparungen und damit verbunden Werkstoffe mit hoher Leistungsfähigkeit gefragt. Faserverbundwerkstoffe und hier insbesondere kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) zeichnen sich dadurch aus, dass ihre Struktur an die später aufzunehmenden Lasten angepasst werden kann, wodurch hohe Festigkeiten bei erheblichen Gewichts- und Kosteneinsparungen realisierbar sind. So werden neben dem Einsatz in der Fahrzeugindustrie beispielsweise in der Luftfahrtindustrie beim Airbus A 380 bereits heute 22% des Massestrukturanteils aus CFK gefertigt [1]. Bei der Boeing 787 soll dieser Anteil auf 50% und beim Airbus A 350 sogar auf über 60% ansteigen [1].

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 [2].

Ein immanentes Problem bei der Herstellung von CFK ist jedoch das Auftreten von Poren, die sich negativ auf die mechanischen Eigenschaften auswirken [3, 4]. Für die Hersteller und Anwender von CFK ist dies eine zurzeit drängende und ungelöste technische Herausforderung [5]. Gelingt es, die Porositätsausbildung zu reduzieren und die Bauteile im Fertigungsprozess hinsichtlich Porosität zu überprüfen, so eröffnet dies den Weg für weitergehende Wanddickenreduzierungen und damit weitere Gewichtseinsparungen und Energiekostenreduzierungen.

Ziele des beantragten Projektes waren:

- **Entwicklung leistungsfähiger Werkzeuge zur dreidimensionalen Charakterisierung von CFK-Strukturen und Porosität.** Bisher wurden die Strukturinformationen aus dem Bauteilinneren von CFK im allgemeinen durch licht- oder rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen gewonnen, wodurch nur eingeschränkte Informationen aus Schnittebenen geliefert werden. Röntgencomputertomografie (CT) mit anschließender dreidimensionaler Bildanalyse kann hingegen die vollständigen Volumeninformationen liefern. In diesem Forschungsprojekt sollte ein Verfahren entwickelt werden, um Informationen bezüglich der dreidimensionalen CFK-Struktur und Porosität zu gewinnen und abzubilden. Angestrebt wurde die Quantifizierung der Porenvolumenverteilung, der Porengrößenverteilung und Porenform mit morphologischen Werkzeugen der Bildanalyse. Aufgrund der geringen Kontrastunterschiede zwischen CFK und Poren ist diese Quantifizierung auf

Basis von Schwellwertverfahren und einfachen Binarisierungsalgorithmen nicht möglich. Vielmehr müssten hierfür speziell an die CFK-Problematik angepasste Verfahren unter Einsatz darüber hinausgehender morphologischer Werkzeuge entwickelt werden.

- **Ermittlung des Einflusses von Prozessparametern auf die Struktur der CFK mit dem Ziel der Verbesserung der Herstellungsprozesse.** Untersucht wurden die Einflüsse der Prozessparameter, wie beispielsweise Injektionsgeschwindigkeit, Werkzeugtemperatur und Injektionsdruck beim sogenannten RTM-Verfahren auf die Struktur der CFK und insbesondere die Ausbildung von Porosität. Die Informationen zu Struktur und Porositätsbildung wurden mittels der im vorherigen Punkt entwickelten dreidimensionalen, CT-basierten Untersuchungs- und Analysemethoden erhalten.
- **Entwicklung zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Qualitätssicherung von CFK-Bauteilen und -Halbzeugen im Fertigungsprozess bezüglich Porosität.** Neben der Bewältigung großer Bauteilabmessungen (z.B. Flugzeugseitenruder) und komplexen Geometrien bestehen die Anforderungen an ein solches Prüfverfahren aus hoher Geschwindigkeit, Zuverlässigkeit und Kosteneffizienz. Ultraschallprüfverfahren erfüllen diese Anforderungen und werden in automatisierter Form in großem Umfang zur Prüfung von CFK-Bauteilen auf Einschlüsse, Verbindungsfehler usw. eingesetzt. Bislang nicht zufriedenstellend gelöst werden konnte allerdings die Problematik der Bestimmung der Porosität in CFK-Bauteilen. Insbesondere war bislang die Kenntnis der Porenvolumenverteilung und Porenform nicht genau genug bekannt, um eine tragfähige Korrelation zwischen Ultraschallmessgrößen und Porosität herzustellen. Die im vorherigen Punkt entwickelten Werkzeuge zur dreidimensionalen Bestimmung der Porosität liefern die erforderlichen Kennwerte um diese Korrelationen zu ermöglichen und sind deshalb von essenzieller Bedeutung für die Ultraschallverfahrensentwicklung.

In diesem Forschungsprojekt wurden Porositätskenngrößen, wie Porengrößenverteilungen und Porenformfaktoren, in CFK-Proben mittels Röntgencomputertomografie und 3D-Bildanalyse ermittelt und anhand gezielter Schliffpräparation und Lichtmikroskopie validiert. Wichtig war hierbei, die Kennwerte in Probenabmessungen charakterisieren zu können, welche ausreichend groß sind, um als Ausgangsbasis für die Entwicklung von Ultraschallprüfverfahren zu dienen.

Im ersten Schritt wurden verschiedene Verfahren der 3D-Bildanalyse untersucht. Durch Vergleich der CT-Slices mit den aus gezielter Schliffpräparation und Lichtmikroskopie erhaltenen Daten wurde das für die Problemstellung optimale Verfahren entwickelt, wobei die optischen Messungen als Referenz für die aus CT-Slices und 3D-Bildanalyse erhaltenen Daten gesetzt wurden.

Das so gewonnene optimierte Verfahren diente im nächsten Schritt zur quantitativen Bestimmung der Porositätskennwerte für eine statistisch relevante Anzahl an

Poren und Proben. Die Bewertung der Güte der Porencharakterisierung erfolgte durch Ermittlung der Messabweichung der Porenkenngrößen der CT-Slices von den mittels Lichtmikroskopie erhaltenen Größen derselben Ebenen. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse.

3 Vorgehen und Ergebnisse

3.1 Vorgehen und Ergebnisse des Arbeitsblocks 1: Röntgencomputertomografie (CT) und Bildanalyse

3.1.1 AP 1: Beschaffung und Herstellung von CFK-Proben unterschiedlicher Porosität

Zum Projektstart wurde eine Auswahl an CFK Proben im Rahmen von Bachelorarbeiten beim Industriepartner hergestellt bzw. vom Industriepartner beschafft. Die Proben sollten möglichst ein breites Spektrum der eingesetzten textilen Halbzeugmaterialien widerspiegeln. So sind zwei Probengruppen entstanden, die nicht nur nach verwendeten Gewebe und Gelegearten unterschieden werden könnten, sondern auch nach ihrer Dicke und Matrix. Die wichtigsten Eigenschaften der Proben sind in der Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Aufstellung der zwei Arten der untersuchten CFK-Proben

Probenart Probengruppe	Textile Halbzeugart	Harzsystem	Herstellungs- verfahren	Wandstärke
CFK 1	Gewebe	EP/UP*	RTM	2,5 mm
CFK 2	Gelege	EP	RTM	2,5 – 8 mm
*EP – Epoxidharz *UP – ungesättigtes Polyesterharz				

3.1.1.1 Probenart Gewebe

Gewebe sind Flächengebilde die mittels Fachbildung aus rechtwinklig verkreuzenden Fäden zweier Fadensysteme, Kette und Schuss, hergestellt sind. In einer Kette wird rechtwinklig dazu ein Faden, der sogenannte Schuss, eingetragen.

Alle CFK-Versuchsbauteile, die in ihrer Struktur unterschiedliche Gewebearten als textiles Halbzeug enthalten, wurden im Rahmen von Bachelorarbeiten im Hause des Projektpartners (C.F. Maier Europlast GmbH) mittels RTM-Verfahren für dieses Projekt hergestellt (siehe Bild 1).

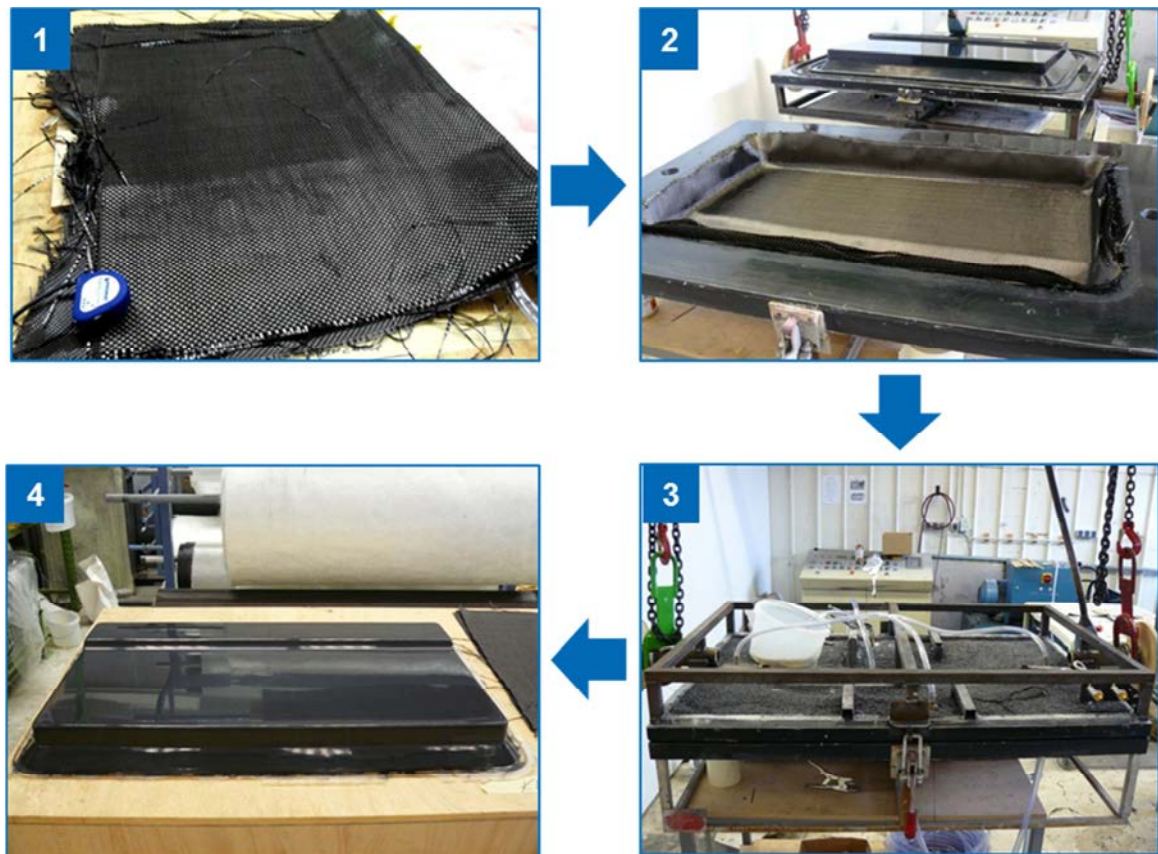


Bild 1: Herstellung der CFK-Versuchsbauteile bei der Firma C.F. Maier Europlast GmbH.

Im Bild 1 dargestellten Verlauf der Herstellung kann in vier Produktionsstufen unterteilt werden:

1. **Zuschnitt.** Dabei werden zwei Lagen von Körper- und zwei Lagen Leinwandgewebe zurecht geschnitten und ins Werkzeug (Matrize) gelegt, mit zweiter Hälfte geschlossen und fixiert.
2. **Injektion.** Das Harz wird durch zuvor angelegte Leitungssysteme (PE-Schläuche) mit Hilfe von Vakuumdruck in die Kavität eingeleitet (injiziert). Die Kavität wird solange entlüftet bis die ersten Teile des Harzes den Austrittspunkt erreicht haben und keine Luftbläschen mehr nachströmen.
3. **Aushärten.** Das Vakuum wird bis zum Aushärten des Harzes aufrecht gehalten, um die im Harz und Gewebe eingeschlossene Luft möglichst vollkommen zu entfernen.
4. **Entformen.** Nach einer Aushärtezeit von 2 Stunden wird das Bauteil aus dem Werkzeug entnommen.

Aus dem hergestellten Versuchsbauteil wurden mehrere Proben für die weiteren Untersuchungen entnommen (siehe Bild 2).



Bild 2: Untersuchten CFK-Proben mit zwei unterschiedlichen Gewebelagen. Wandstärke blieb im Laufe der Untersuchungen konstant.

Für die Gewebe-Proben wurden hauptsächlich zwei Gewebearten, wie Leinwand und Köper verarbeitet. (siehe Bild 3).

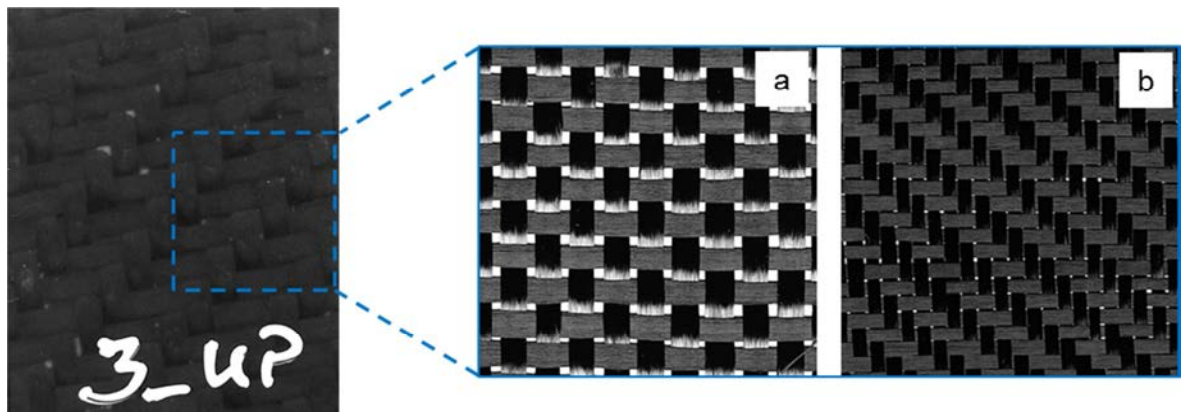


Bild 3: Schematische Darstellung des Aufbaus der Probe mit einem Gewebe. In den untersuchten Proben verwendeten Gewebearten (a) - Leinwand und (b) – Köperbindung.

Zuerst wurden Proben als Ausgangsbasis für die im Arbeitsblock 1 zu entwickelnden bildbearbeitenden Verfahren zur quantitativen Porenanalyse in CFK hergestellt.

In einem späteren Zeitabschnitt wurden dann Proben für den Arbeitsblock 2 hergestellt. Hierzu wurden- zur Untersuchung und Erweiterung des Verständnisses der Korrelation zwischen Produktionsparameter und Porosität- bei den CFK-Versuchsbauteilen Injektionsdruck, Injektionsgeschwindigkeit und Werkzeugtemperatur variiert. Die aus den Versuchsbauteilen entnommenen CFK-Proben wur-

den später mittels CT und Bildanalyse analysiert und die Korrelation zwischen Versuchsparametern und Porosität ermittelt.

3.1.1.2 Probenart Gelege

Ein Gelege besteht aus mehreren Lagen parallel angeordneter Faserrovings. Die einzelnen Lagen unterscheiden sich in der Faserorientierung, deren Ausrichtung mit einem Winkel zur Produktionsrichtung angegeben wird (Produktionsrichtung: 0°-Lage). So gibt es zweilagige (biaxiale) Gelege, in denen die Ausrichtung der Fasern z.B. 0° und 90° (oder auch +45°/-45°) ist oder mehrlagige (multiaxiale) Gelege, mit einer Lagenausrichtung 90°, -45°, 0°, +45° (vierlagig) um nur zwei mögliche Beispiele zu nennen. Die Lagen sind zunächst nicht untereinander verbunden. Zur besseren Handhabung werden sie allerdings noch im Produktionsprozess miteinander verwirkt.

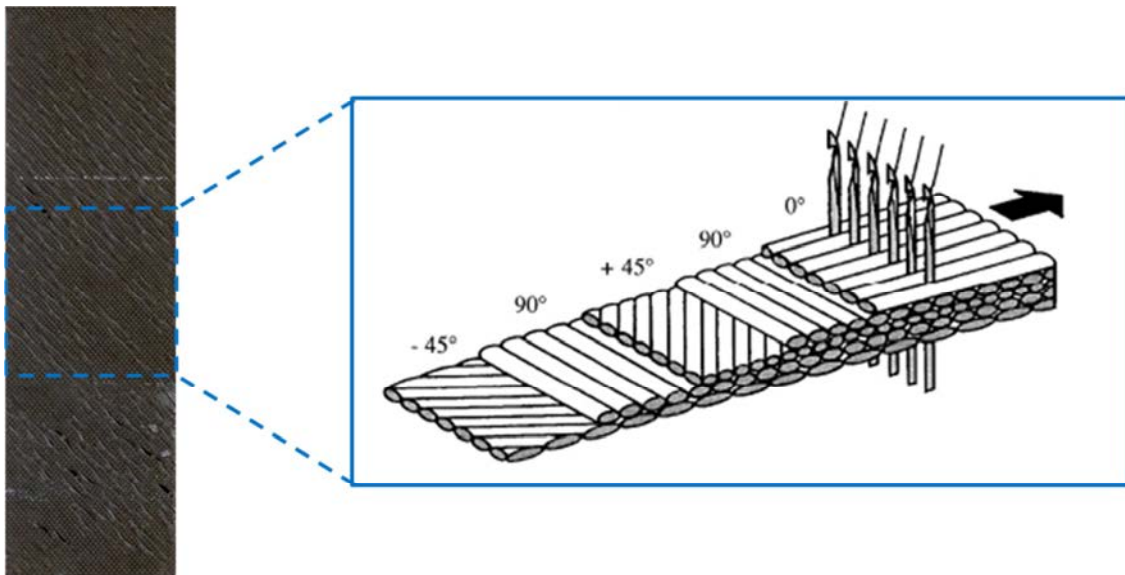


Bild 4: Schematische Darstellung des Aufbaus der Probe mit einem Multiaxialgelege

Von der Firma IntelligeNDT Systems & Services wurde für Untersuchungen in diesem Forschungsprojekt ein Sortiment von Gelegeproben unterschiedlicher Dicken (2mm bis 8mm) und unterschiedlicher Porositätsgehalte beschafft. Die Proben entstammen der Luftfahrtindustrie und wurden dort im Rahmen von Versuchsreihen hergestellt. Die Probenbeschaffung zog sich aufgrund von Engpässen in der Luftfahrtindustrie über mehrere Monate hin. Bild 5 zeigt exemplarisch einige der beschafften Proben.

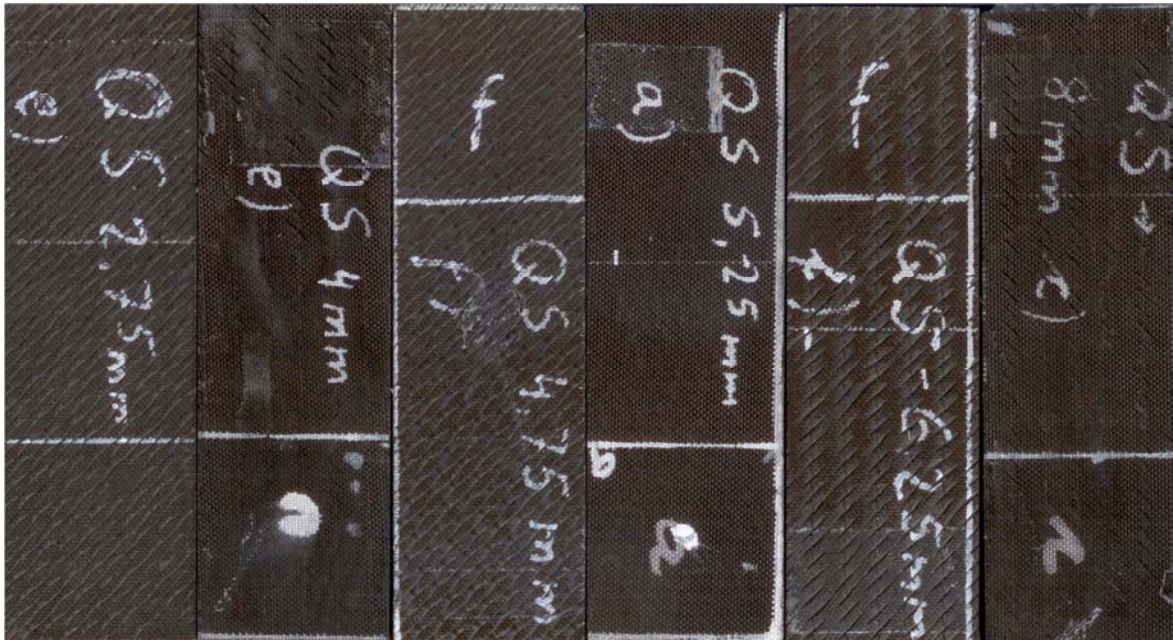


Bild 5: Beschaffte CFK-Multiaxiallege-Proben mit unterschiedlicher Anzahl der Gelegelagen und Dicke.

3.1.2 AP 2, 3 und 5: Mikro und Nano-CT an CFK-Proben hinsichtlich Porosität, Optimierung der Aufnahmeparameter

Die Ergebnisse der Inhalte dieser drei Arbeitspakete werden im Folgenden zusammenhängend beschrieben. Für die 3D-Aufnahmen kommt ein Computertomograph der Fa. Phoenix x-ray (System v|tome|x) zum Einsatz.



Bild 6: Röntgencomputertomograf an der Hochschule Aalen.

Als Erstes wurden die CT-Aufnahmen der CFK-Proben mit Voxelgröße 20 und 60 μm mittels Mikro-CT angefertigt. Danach erfolgte die Trennung jeder Probe in vier Quadranten für die Untersuchungen mit Nano-CT (10 μm Voxelgröße). Das Bild 7 stellt ein 3D-Volumen einer mit 20 μm Voxelgröße aufgenommene Probe dar. Aus diesem Volumen werden infolge der Untersuchungen einzelne CT-Slices entnommen, die anschließend für den qualitativen und quantitativen Vergleich verwendet wurden. Es besteht die Möglichkeit ein 3D-Volumen von unterschiedlichen Seitenlagen (Bild 8) zu betrachten und die CT-Slices von verschiedenen Richtungen zu extrahieren. Dies kann dazu benutzt werden die Poren aus einem anderen Winkel zu betrachten und mit Schliffbild desselben Lage zu vergleichen.

Aufgrund der kleinen Dichteunterschiede zwischen Kohlenstofffaser und Epoxid- bzw. UP-Matrix ist es wichtig, einen hohen Kontrast (eine hohe Anzahl an Grauwerten im Histogramm) zwischen den Materialien zu erreichen. Dafür wurden mehrere Faktoren in Betracht gezogen, die einen Einfluss auf den Kontrast haben. Folgende Aufnahmeparameter wurden im Laufe der Arbeit optimiert:

- Position der Probe im Strahlungsgang
- Röhrenstrom und Röhrenspannung
- Anzahl der Projektionen
- Einsatz des Filters
- Belichtungszeit

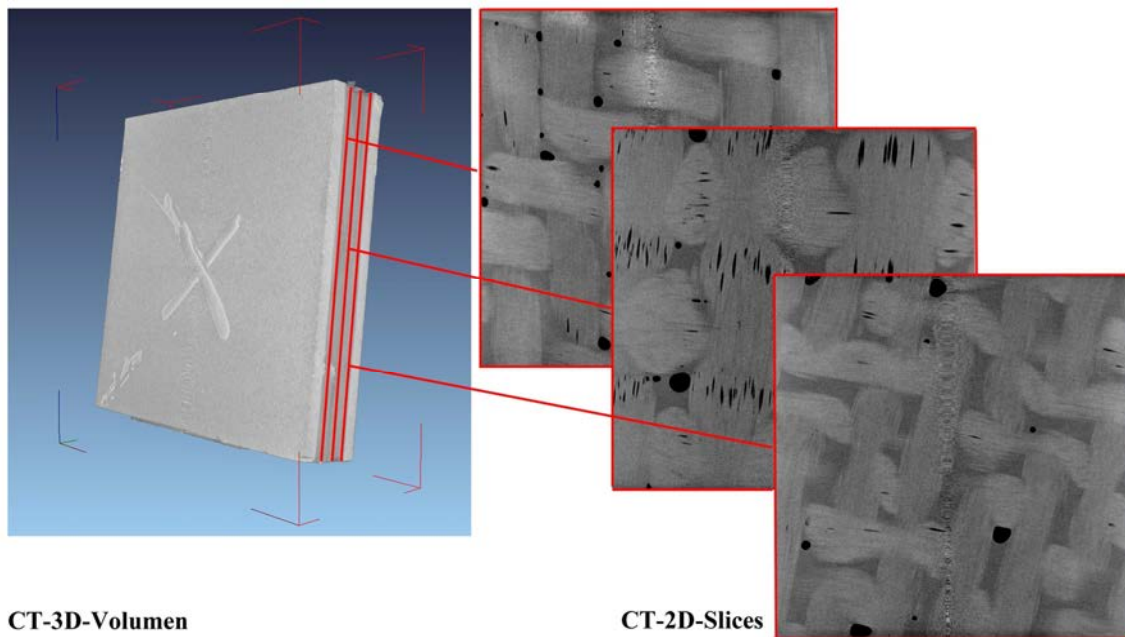


Bild 7: Darstellung des 3D-Volumens in VGStudio 2.0 mit entnommenen Slices. Aufgenommen mittels Mikrofokusröhre mit 20 μm Voxelgröße. Die Probengröße in 3D-Darstellung beträgt 30x30x2,5 mm.

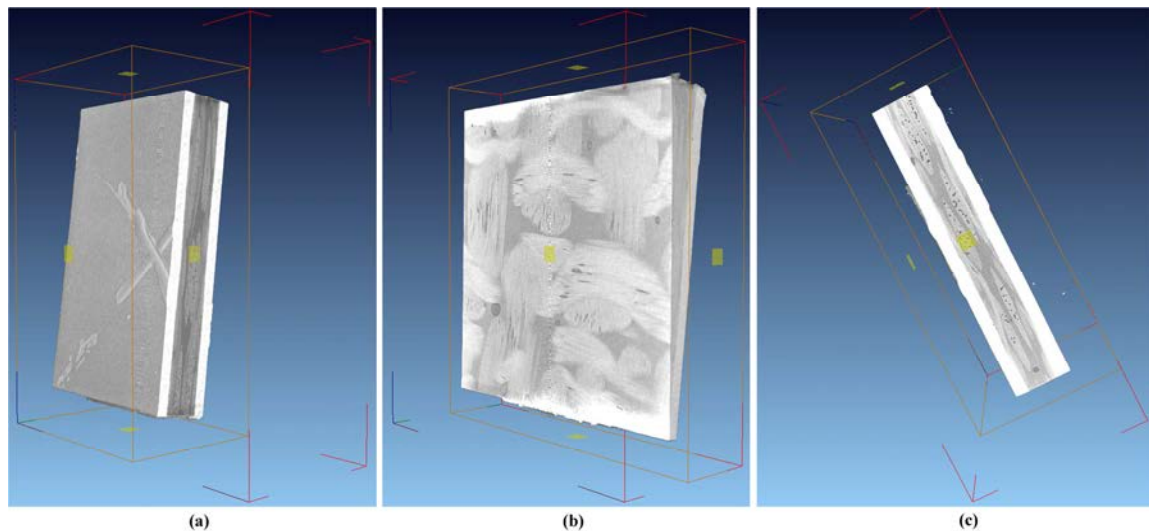


Bild 8: Verschiedene Ansichten eines 3D-Volumens. Aufgenommen mittels Mikrofokusröhre mit 20 μm Voxelgröße. Die Probengröße in 3D-Darstellung beträgt 30x30x2,5 mm.

Nach der Fertigstellung der CT-Aufnahmen können mehrere CT-Slices mit verschiedenen Voxelgrößen qualitativ gegenübergestellt und miteinander verglichen werden.

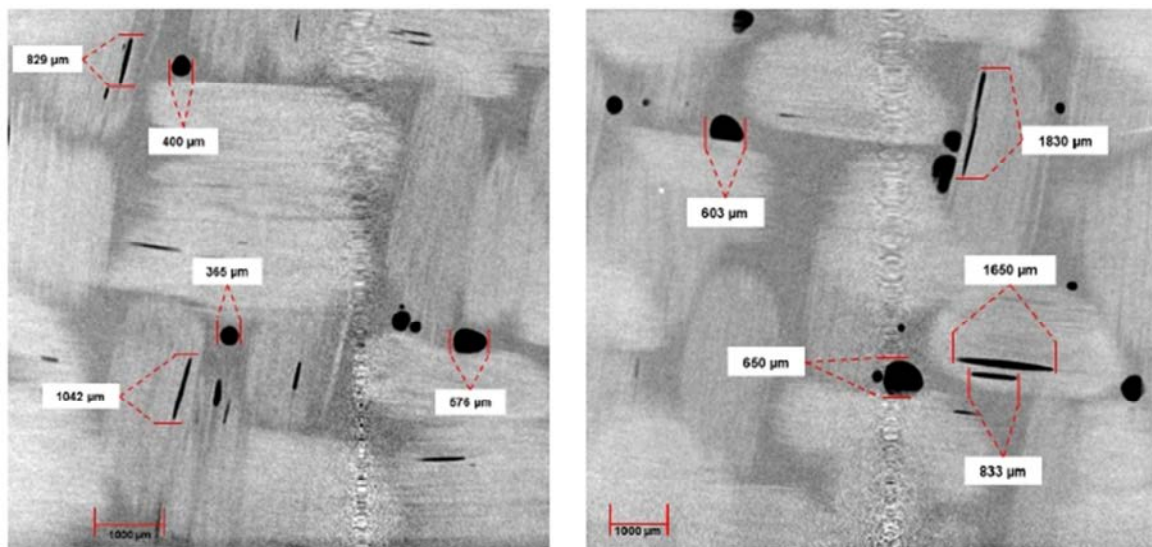


Bild 9: Frei ausgewählte CT-Slices von unterschiedlichen CFK-Proben. Aufgenommen mit Mikrofokusröhre, 20 μm Voxelgröße. Links: Ca. 100 μm unter der Oberfläche liegender CT-Slice. Rechts: Ca. 120 μm unter der Oberfläche liegender CT-Slice.

Da die Schliffbilder später eine Referenz zum CT-Slice darstellen, sollen zwei ausgewählten Voxelgrößen miteinander und einzeln mit Schliffbild verglichen werden. Für diesen qualitativen Vergleich wurden im 3D-Volumen mit 10 und 20 μm Voxelgröße zwei Ausschnitte angelegt, die später auf Ziel präpariert wurden.

Die Gewebe-Probe (C.F. Maier Europlast) wurden bereits mit Abmessungen 30 mm x 30 mm direkt vom Bauteil entnommen. Gelege-Proben von Areva / intelligenteNDT mussten zunächst in zwei Bereiche jeweils 30 mm x 30 mm unterteilt wer-

den, wobei ein Teil der Gesamtprobe für die Ultraschalluntersuchungen bestimmt ist und darf nicht zerstört werden (siehe Bild 10). Der andere Bereich der Probe wurde für die CT-Messungen und Schliffpräparation genutzt.

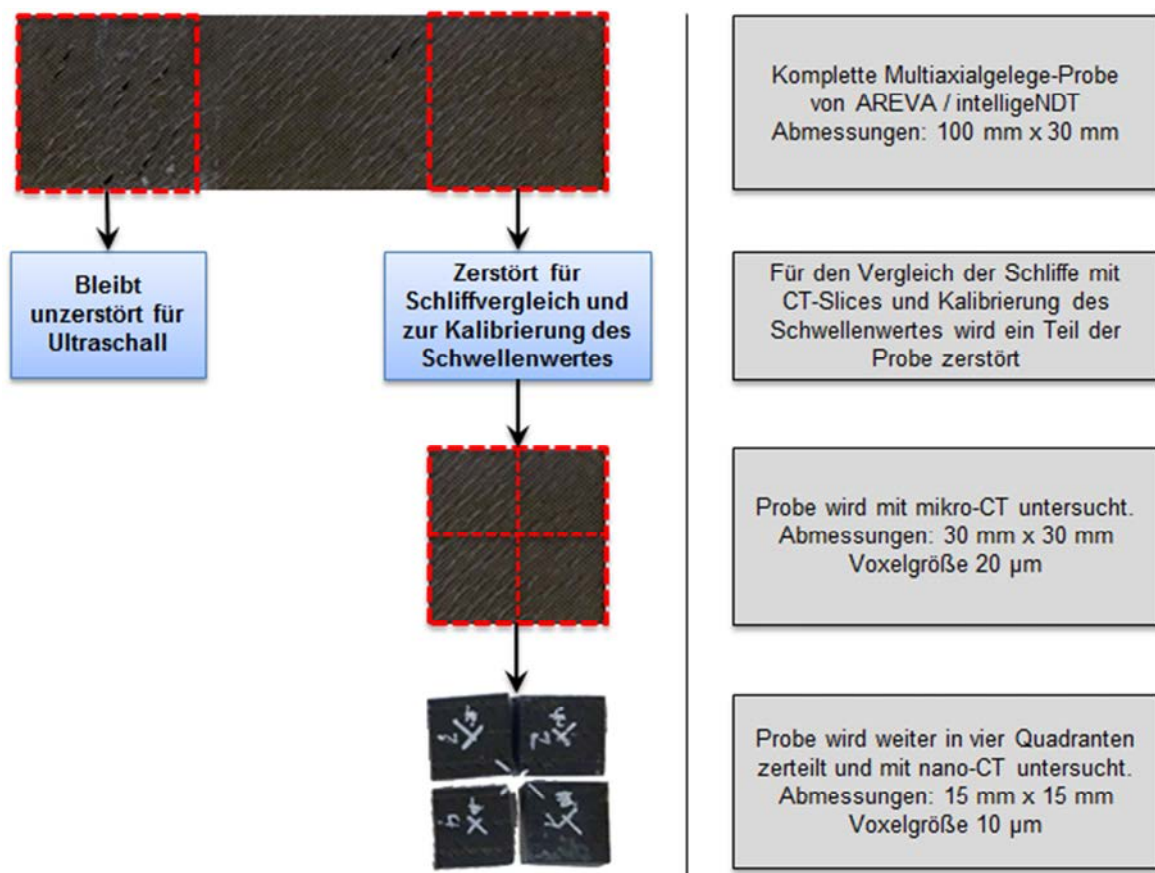


Bild 10: Schematische Darstellung des Untersuchungsablaufes bei der röntgencomputertomografischen Messungen.

Im Bild 10 wurde schematisch der Vorgang der Untersuchung dargestellt. Als Erstes wurden die kompletten Proben mit 60 µm Voxelgröße aufgenommen, um die grundlegenden Informationen über die Porosität in der CFK-Probe zu beschaffen (siehe Bild 11).

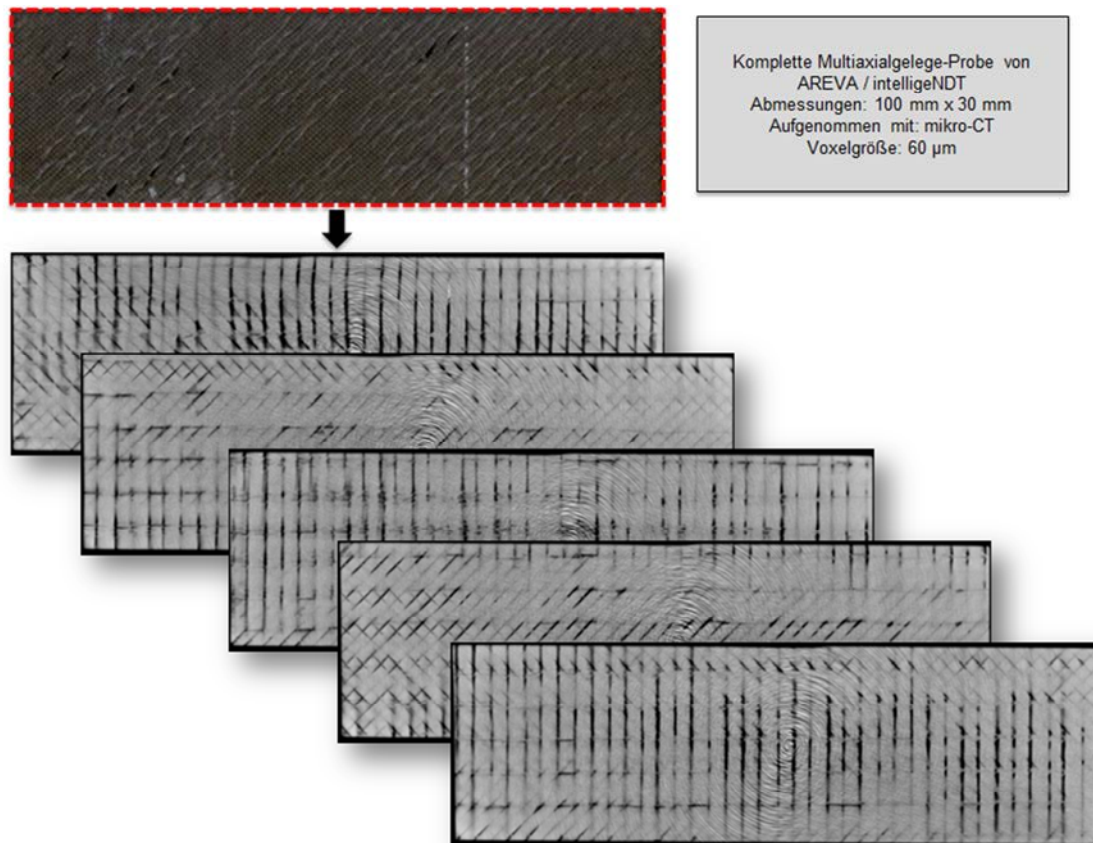


Bild 11: Übersichtsaufnahmen der Multiaxialgelege-Probe. Aufgenommen mittels mikro-CT mit 60 μm Voxelgröße.

Ein weiterer Schritt beinhaltet die Entnahme des 30 mm x 30 mm – Bereiches für die nachfolgende mikro-CT-Messung mit 20 μm Voxelgröße. Die gewonnenen 3D-Volumendaten werden für den Vergleich mit 10 μm Voxelgröße (nächster Schritt) und für die Quantifizierung der Porosität genutzt (Bild 12).

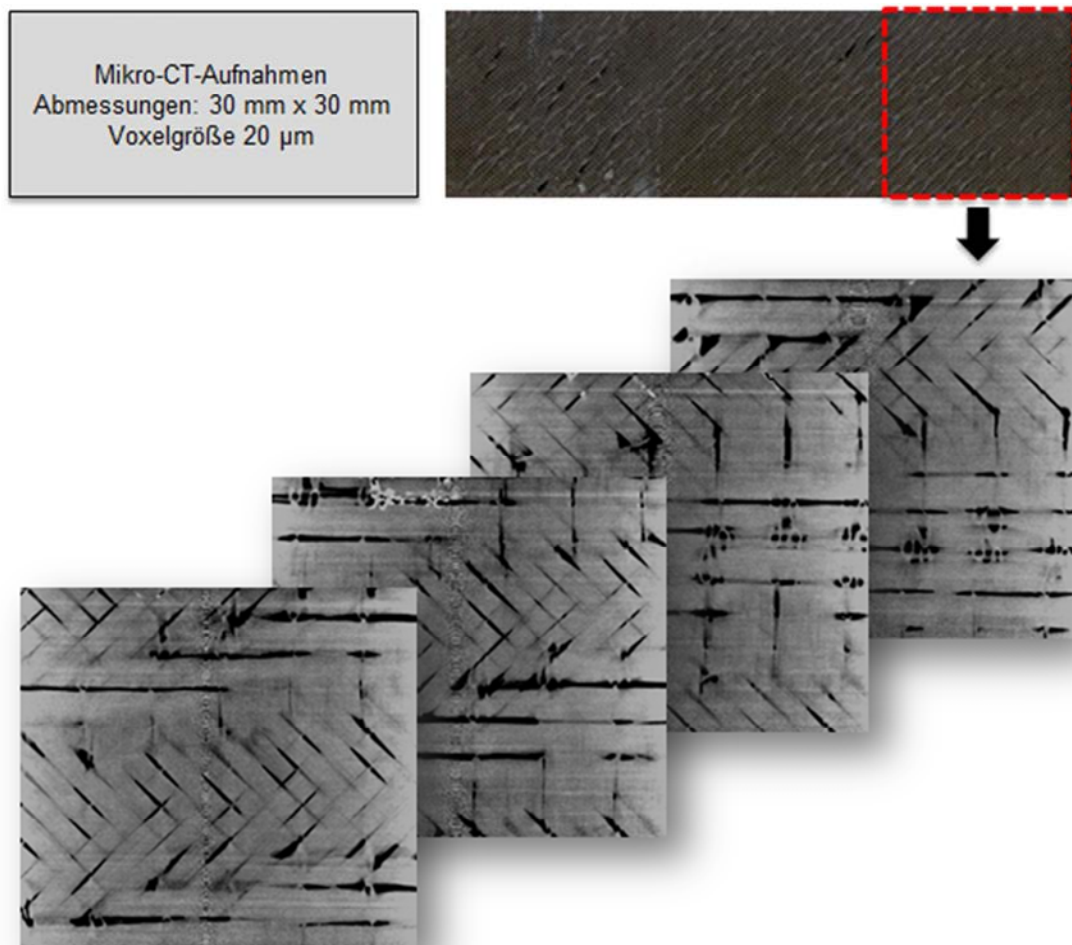


Bild 12: Übersichtsaufnahmen eines Ausschnittes (30 mm x 30 mm) der Multiaxialgelege-Probe. Aufgenommen mittels mikro-CT mit 20 µm Voxelgröße.

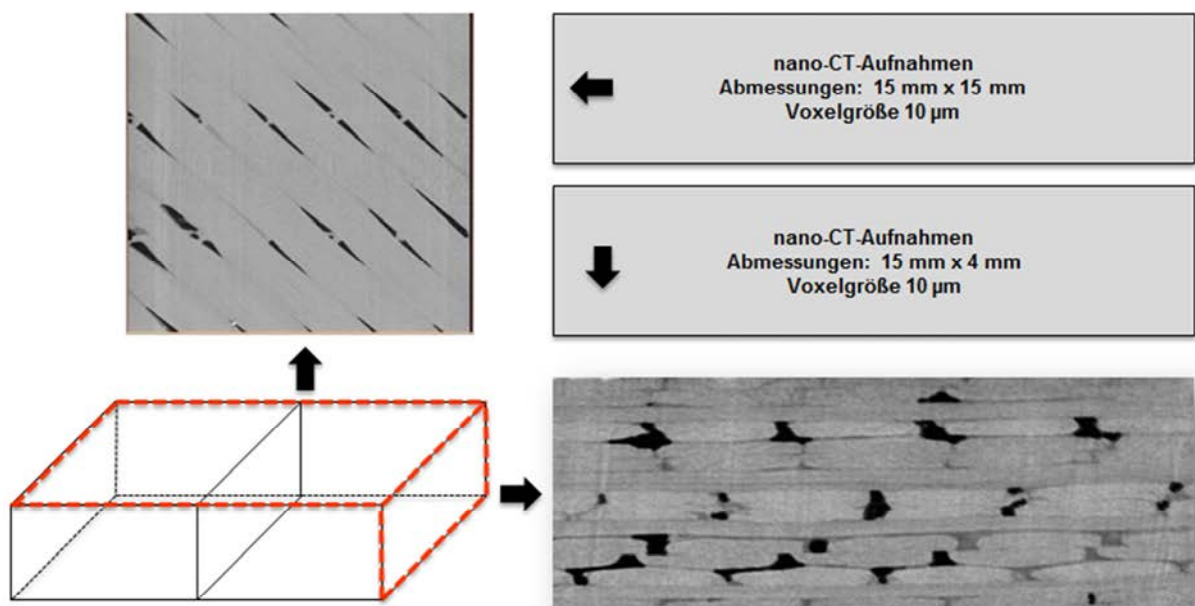


Bild 13: Aus dem 3D-Volumen extrahierte Quer- und längsslices. Aufgenommen mit nano-CT mit 10 µm Voxelgröße

Anschließend wurden die 30 mm x 30 mm – Proben in vier Quadranten zerteilt und einzeln mit nano-CT bei 10 μm Voxelgröße gemessen (Bild 13). Die Volumendaten wurden für den Vergleich mit Schliffen und für Findung (Kalibrierung) des Schwellenwertes genutzt. Um die mögliche Fehler beim Vergleich von CT-Slice mit Schliff auszuschließen wurden zwei Betrachtungsrichtungen (längs- und quer) ausgewählt und angewendet.

3.1.3 Vergleich verschiedener Voxelgrößen mit Lichtmikroskopie

Bei qualitativem Vergleich der CT-Aufnahmen, die bei unterschiedlichen Voxelgrößen aufgenommen wurden, wurden deutliche Unterschiede festgestellt. Besonders die 60 μm Voxelgröße leiden unter schwachen Kantenkontrast und allgemeinen Schärfe- und Detaileindruck. Die Kleinelemente wie längliche Poren sind schwer detektierbar und nur mit großer Anstrengung zu erkennen. Annähernd runde Poren dagegen werden außerordentlich gut abgebildet, haben aber eine Detektionsgrenze von ca. 250 μm . Grundsätzlich können die 60 μm CT-Aufnahmen für einen Überblick über die vorhandene Porosität angewendet werden. Die genaue quantitative Analyse mit dieser Auflösung ist zurzeit schwer vorstellbar und kann nur für die größeren Porenelemente mit beträchtlichem Berechnungsfehler durchgeführt werden.

Für 10 und 20 μm Voxelgröße können dagegen unproblematisch mit lichtmikroskopischen Bildern verglichen werden. Ausreichende Bildschärfe und Bildkontrast ermöglichen genauere Abmessung der Porenelemente im CT Slice Bild 14 und im Schliffbild und können mit Avizo Fire problemlos quantifiziert werden.

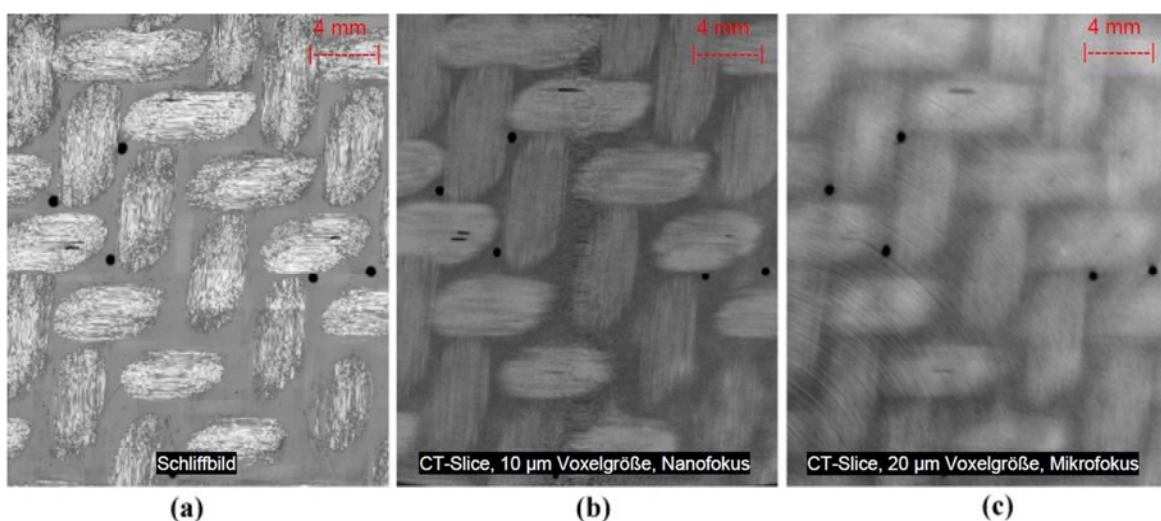


Bild 14: (a)-Schliffbild, (b)- Ein Bildausschnitt aus einem CT-Slice für den Vergleich mit Schliffbild und 20 μm Voxelgröße. Aufgenommen mittels Nanofokusröhre mit 10 μm Voxelgröße. (c)-CT-Slice für den Vergleich mit Schliffbild und 10 μm Voxelgröße. Aufgenommen mittels Mikrofokusröhre mit 20 μm Voxelgröße.

Im Bild 14 lässt sich gut erkennen, dass alle Poren in 10 μm und 20 μm Voxelgröße deutlich identifizierbar sind und mit Schliffbild gleicher Ebene gut übereinstimmen. Trotz einem schwächeren Kontrast bei 20 μm Voxelgröße gegenüber der 10 μm – Aufnahmen, zeigen diese Aufnahmen gute Ergebnisse bei der Segmentierung in der weiterfolgenden quantitativen Analyse. Die genaueste Übereinstimmung einzelnen Porenelementen hinsichtlich Geometrie, Kantenschärfe und Kantekontrast kann bei CT-Aufnahmen mit 10 μm Voxelgröße bestätigt werden. Folglich wurde mit 10 μm Voxelgröße die Basis für die Verfeinerung der Segmentierungsalgorithmen für 20 μm Voxelgröße geschaffen und damit das Verfahren der Segmentierung für die diese Voxelgröße optimiert.

3.1.4 AP 4: Lichtmikroskopie und Zielpräparation

Die Beurteilung der Qualität der CT-Aufnahmen und später der durch Bildanalyse erhaltenen Ergebnisse erfolgte durch Vergleich mit Schliffbildern.

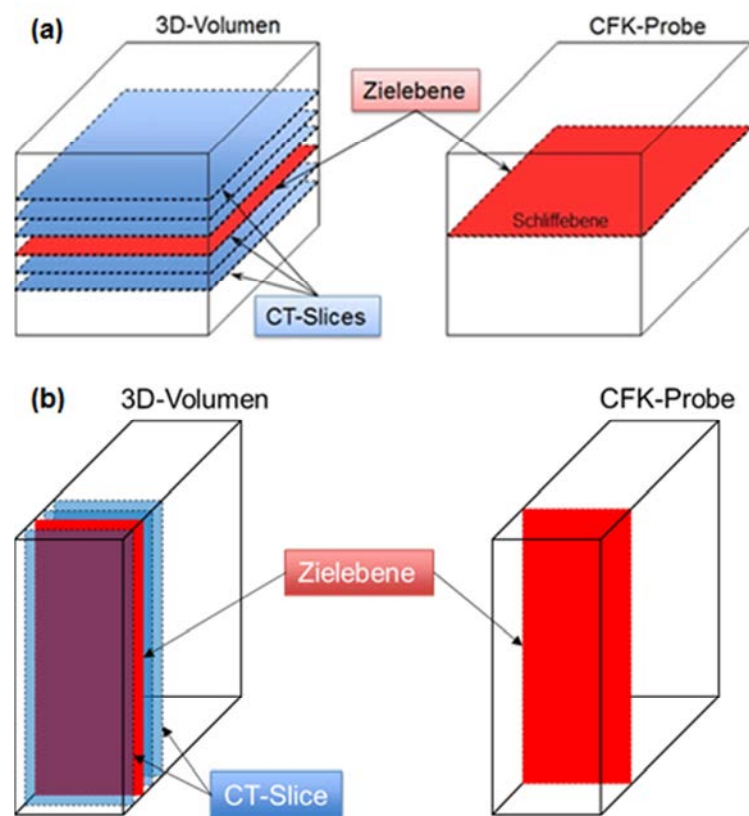


Bild 15: Schematische Darstellung der Zielpräparation. Ein bestimmter CT-Slice wird aus dem 3D-Volumenverbund ausgewählt und auf diesen CT-Slice mit definierter Tiefenlage hin präpariert. (a) – Längspräparation, (b) – Querpräparation.

Eine der Schlüsselrollen für den Vergleich und anschließende Validierung der CT-Aufnahmen spielt die Präparationstechnik der CFK-Proben. Die materialographi-

sche Aufbereitung einer Probe nach dem standardmäßigen Protokoll „Einbetten, Schleifen und Polieren“ ist bei CFK-Proben nur durch zusätzliche Arbeitsschritte möglich. Für die reibungslose Auswertung der Schliffbilder ist es nicht nur die planparallele Ausrichtung der Probe notwendig, sondern auch bis zu 5 µm genauere Zielpräparation auf gewünschte Ebene wichtig.

Diese Problematiken wurden durch die Entwicklung neuer Präparationsverfahren gelöst. Aufgrund der inneren Struktur des CFK (Kunststoffmatrix mit eingebetteten Kohlenstofffasern) war diese Verfahrensentwicklung nicht ganz einfach. Erste Versuche der Zielpräparation mit Standardverfahren lieferten völlig unbrauchbare Ergebnisse, die Schliffe zeigten u.a. Verschmierungen, Kratzer usw. Die Entwicklung der geeigneten Präparationstechnik nahm mehrere Monate in Anspruch. Es musste die Präparationsrezeptur optimiert werden, die planparallele Ausrichtung der Proben beim Einbetten musste realisiert werden, und schließlich wurde die Zielpräparation auf die entsprechende Ebene durch langsames und schonendes Abtragen der Kunststoffmatrix unter ständiger Kontrolle mit Spezialwerkzeugen realisiert.

Für die lichtmikroskopischen Aufnahmen der Schliffbilder wurde das Auflichtmikroskop AxioPlan 2 Imaging der Firma Zeiss eingesetzt (Bild 16). Die Viertelsegmente, die vorher mit CT untersucht und anschließend zielpräpariert wurden, werden mit Auflichtmikroskop bei 50-facher Vergrößerung aufgenommen und entsprechen damit einer Auflösung von 1,2 µm / Pixel.



Bild 16: Auflichtmikroskop AxioPlan 2 Imaging der Firma Zeiss

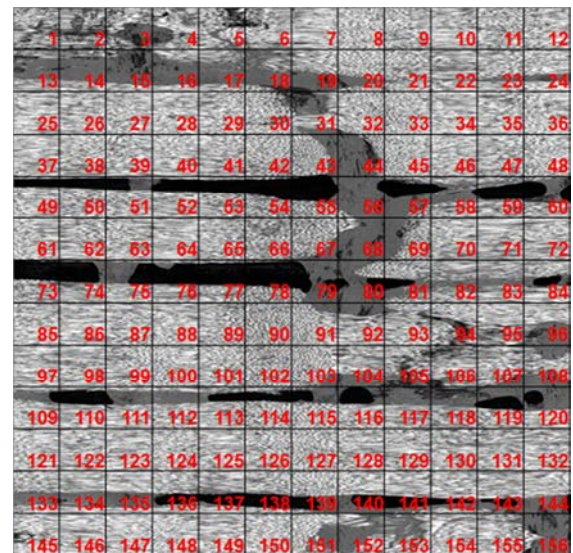


Bild 17: Auf ein Schliff aufgelegter Raster in AxioVision Software.

Da die ganze Schliffoberfläche nicht auf einmal erfasst werden könnte, muss ein passendes Werkzeug für die Panorama – Aufnahmen, wie MosaiX verwendet werden. Man legt mittels Zeiss AxioVision-Software ein Raster über die Oberflä-

che (siehe Bild 17) des Schliffes und nimmt einzelne Bilder mit einer 50-fachen Vergrößerung auf. Das Programm fasst alle Bilder zu einem gesamten Bild zusammen. Das Resultat dieser Zusammenfassung sind die vollständige, zum Vergleich und Segmentieren geeigneten Schliffbilder.

Die nachfolgende Bilder (Bild 18, Bild 19 und Bild 20) zeigen einige Beispiele der Zielpräparation für beide Probenarten (Gewebe und Gelege). Sie zeigen beispielhaft die hervorragende Übereinstimmung der CT-Slices und der nach Zielpräparation erhaltenen lichtmikroskopischen Aufnahmen.

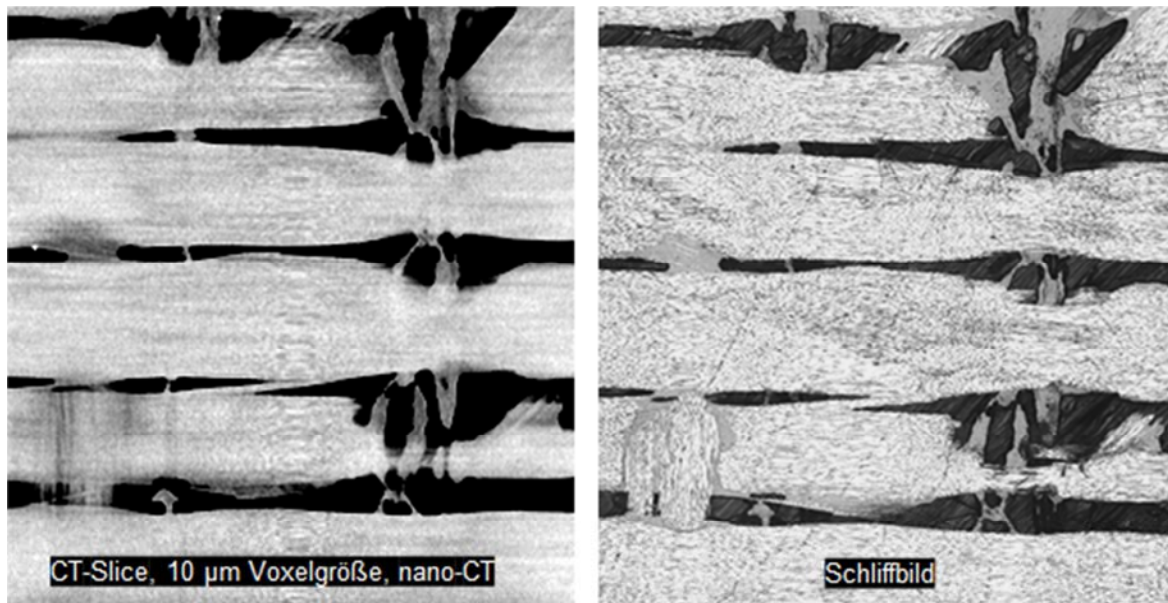


Bild 18: Zielpräparation. Ein CT-Slice und auf entsprechende Tiefenlage präparierter Schliff. Multiaxialgelege-Proben von Areva / intelligente NDT.

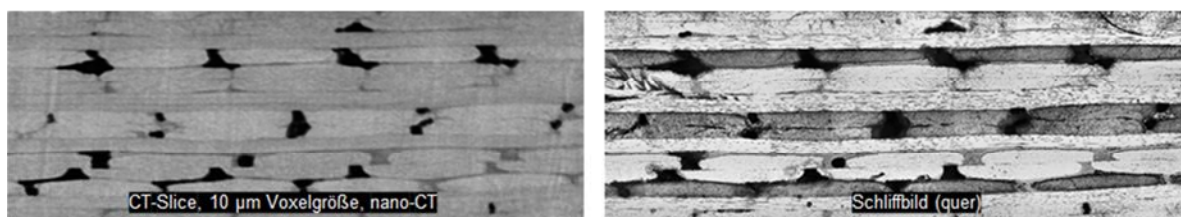


Bild 19: Zielpräparation. Ein CT-Slice und auf entsprechende Tiefenlage präparierter Querschliff. Multiaxialgelege-Proben von Areva / intelligente NDT.

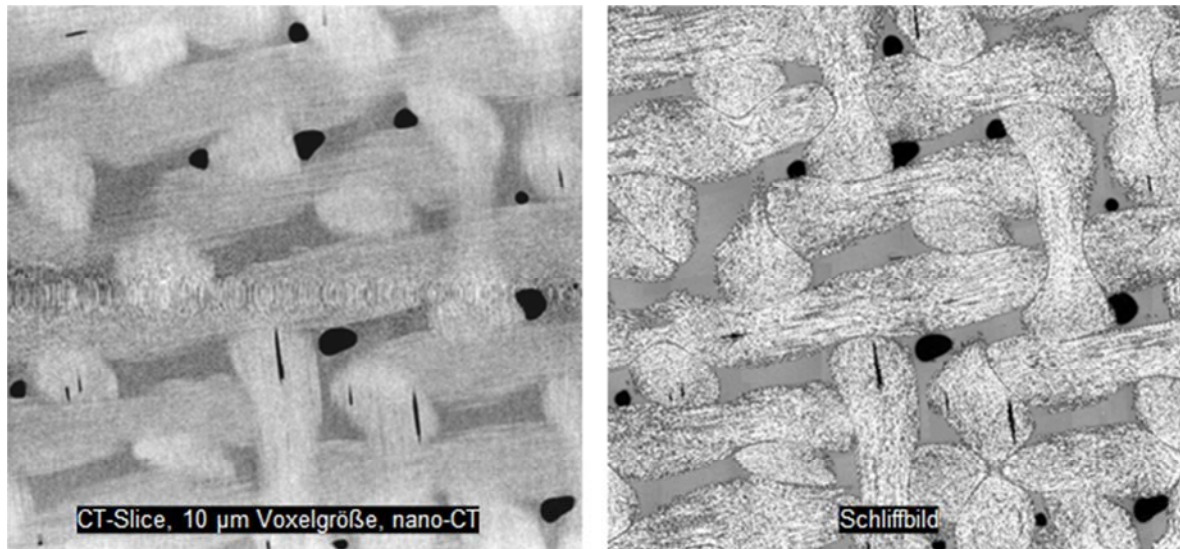


Bild 20: Zielpräparation. Ein CT-Slice und auf entsprechende Tiefenlage präparierter Schliff. Gewebe-Proben von C.F. Maier Europlast.

3.1.5 AP 6: Bildanalyse und Entwicklung CT-basierter Verfahren zur quantitativen Porenanalyse an CFK

Die zwei- und dreidimensionale Bildanalyse wurde mit Hilfe von VSG Avizo Fire realisiert. Dabei wurden bildverbessernde Maßnahmen (Kantenkontrast und Kantenschärfe) und schwellenwertbasierende Segmentierungsverfahren entwickelt, erprobt und erfolgreich eingesetzt. Die Ergebnisse wurden an einer statistisch relevanten Anzahl von Poren durch Vergleich mit Schliffbildern verifiziert. Dies geschah durch Vergleich der ausgewählten Porenkenngrößen wie Fläche, Umfang, Ausdehnung in X bzw. Y-Richtung, Formfaktor im CT-Slice und Schliffbild (Bild 21).

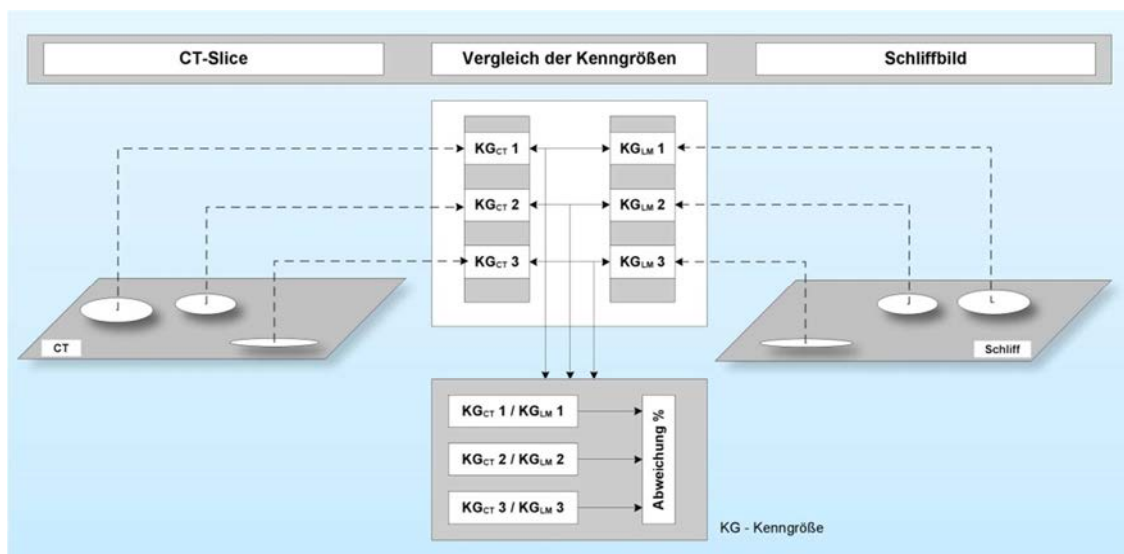


Bild 21: Vorgehensweise statistischer Auswertung der Porenkenngrößen

3.1.5.1 Bildverarbeitungskette zur Bearbeitung von Bild- und Volumendaten

Das Ausgangsvolumen und Schliffbild werden nach Import und Ausrichtung einer Bildbearbeitungskette unterzogen (Bild 22).

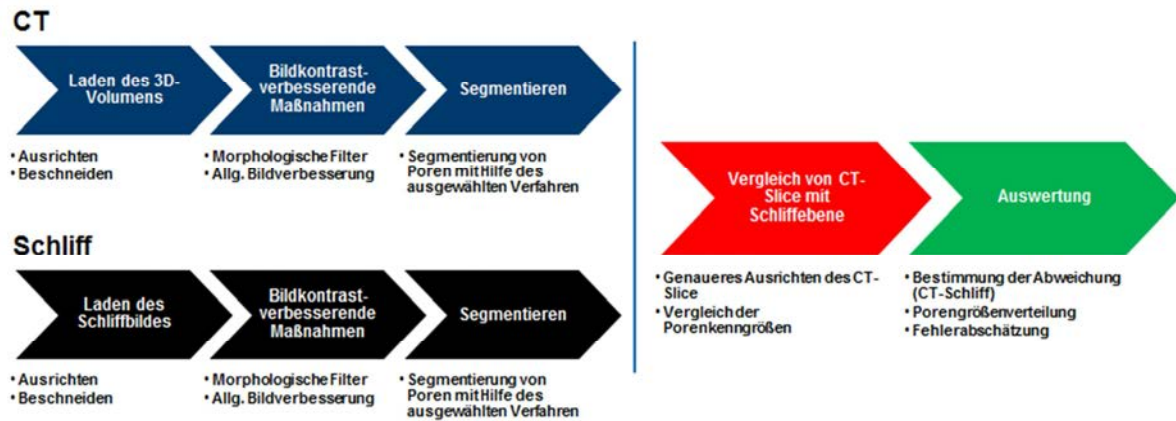


Bild 22: Schematische Darstellung einer Verarbeitungskette von CT-Volumendaten

Das Ziel dieser bildverbessernden Maßnahmen ist eine exakte Segmentierung der Poren in CFK. Dazu musste nicht nur ein besserer Kantenkontrast und Kantenschärfe erreicht werden, sondern auch Detaileindruck, Reduzierung des Bildrauschens und Eliminierung des Restkantenrauschens.

3.1.5.2 Segmentierung und Vergleich der segmentierten CT-Slices mit Schliffbildern

Nach der Bearbeitung erfolgte die Segmentierung, wobei die inhaltlich zusammenhängenden Regionen durch Zusammenfassung benachbarter Pixel oder Voxel (bei der Bestimmung des Volumens der Poren) entsprechend eines bestimmten Homogenitätskriteriums wie Schwellenwert vereint werden. Während der Segmentierung wird ein Binärbild (-volumen) zur Quantifizierung erzeugt, dabei werden die Pixel (bzw. Voxel) innerhalb eines festgelegten Grauwertbereichs mit einer „1“ im Binärbild dargestellt.

Für die Segmentierung wird ein Schwellenwert im Histogramm ausgewählt, der zwischen den Grauwerten der Luft (Poren) und Material (Faser und Matrix) liegt. Bild 23 zeigt ein typisches Grauwertehistogramm der untersuchten Proben mit markiertem Schwellenwert. Die Segmentierung erfolgte mittel dem *Threshold-Modul* in VSG Avizo Fire.

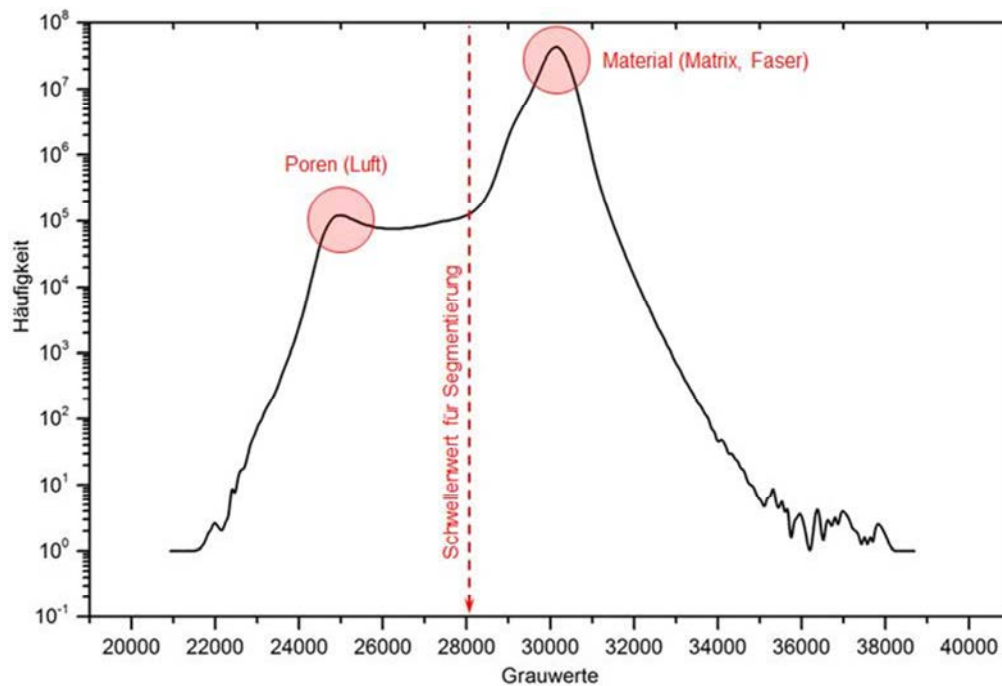


Bild 23: Erläuterung zum Aufbau eines Histogramms und zur Ermittlung eines Schwellwertes

Es wurden die automatisierten Verfahren Momente- und Entropieverfahren untersucht. Diese haben sich aber für unsere Proben den interaktiven, auf Kalibrierung basierenden Verfahren als unterlegen herausgestellt. Es wurde deshalb im weiteren ein interaktives, auf Kalibrierung basierendes Segmentierverfahren entwickelt.

Beim Vergleich wird dem CT-Bild das Schliffbild als Referenz gegenübergestellt. Hierzu ist es notwendig, die richtige Ebene im 3D-Volumen zu finden, die auch dem Schliffbild eines Schliffes entspricht. Dazu legt man in Avizo Fire ein CT-Slice über ein Schliffbild und richtet das 3D-Volumen in einer Richtung so ein, dass visuell keine (bis marginal kleine) Unterschiede zwischen zweier Flächen feststellbar sind. Nach dieser Ausrichtung, bzw. nach vorgenommenen Korrekturen der Neigung und des Skalierungsfaktors werden die Poren erstmals segmentiert. Es wird nun die Abweichung der so segmentierten Porenkenngrößen vom Schliffbild berechnet und durch Variation des Schwellwertes wird diese Abweichung minimiert. Die hierzu in Betracht gezogenen Porenkenngrößen werden weiter unten definiert.

Im Bild 24, Bild 25 und Bild 26 werden die Beispiele der Zielpräparation und der Segmentierung vorgestellt.

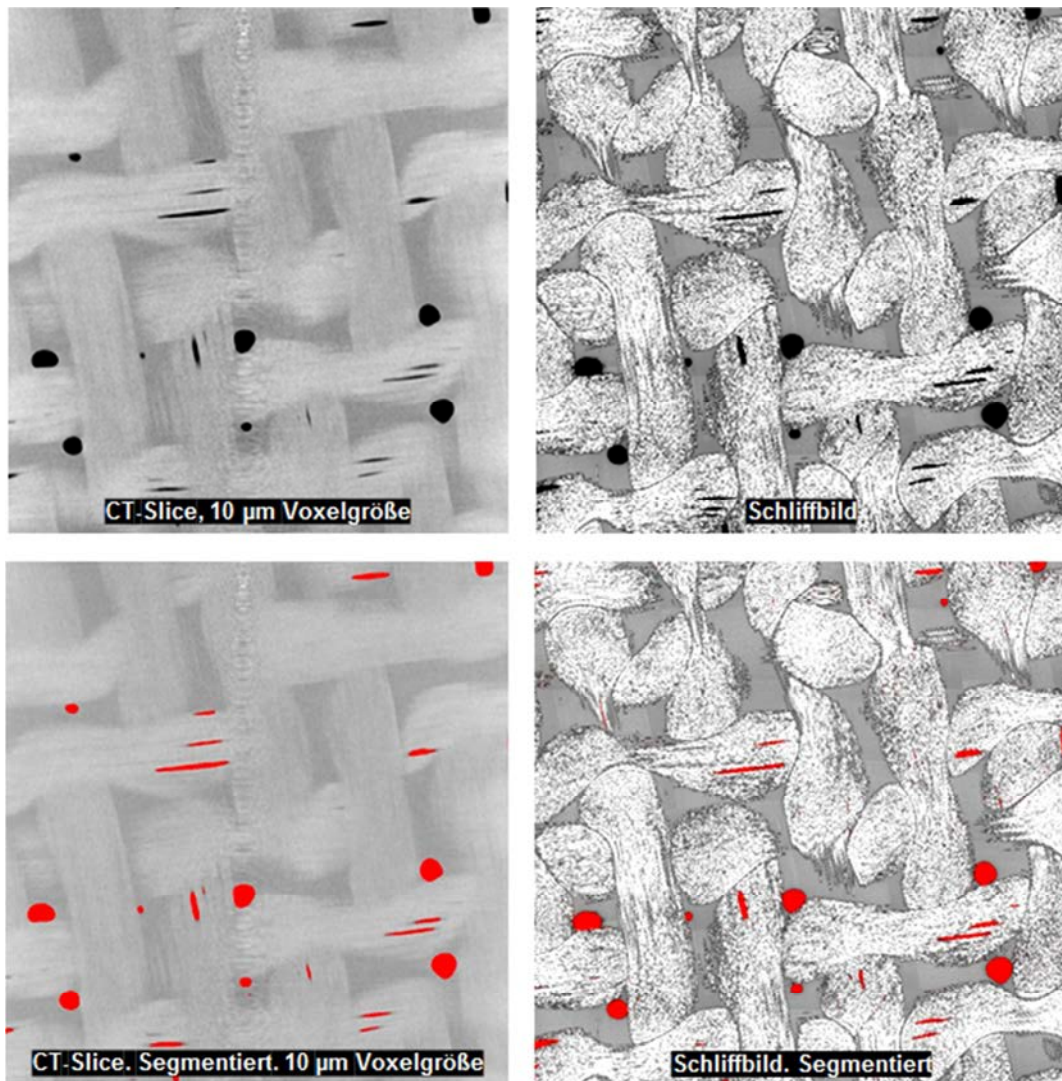


Bild 24: Segmentierter und nicht segmentierter CT-Slice und das Schliffbild der gleichen Tiefenlage. Gewebe-CFK-Proben der Firma C.F. Maier Europlast.

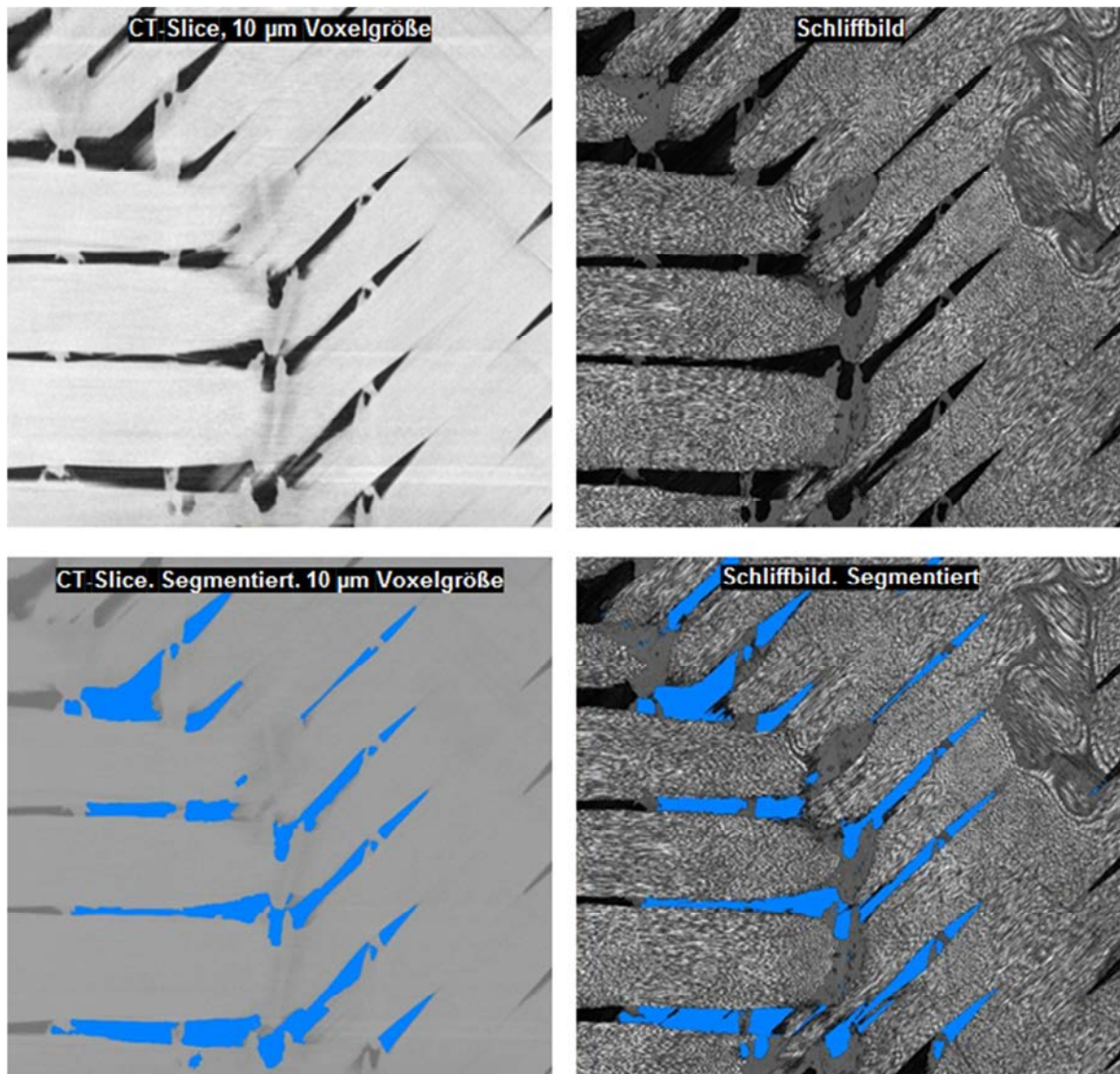


Bild 25: Segmentierter und nicht segmentierter CT-Slice und das Schliffbild der gleichen Tiefenlage. Multiaxialgelege-Proben der Firma Areva / intelligenteNTD.

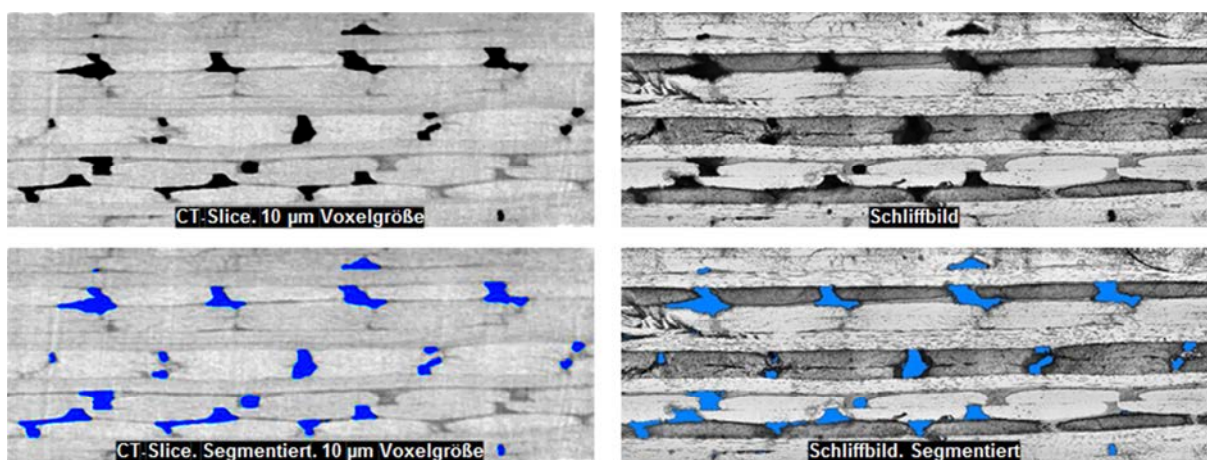


Bild 26: Segmentierter und nicht segmentierter CT-Slice und das Schliffbild der gleichen Tiefenlage in der Querbetrachtung. Multiaxialgelege-Proben der Firma Areva / intelligenteNTD.

3.1.5.3 Verwendete Porenkenngrößen

Der Vergleich der segmentierten CT-Slices mit Hilfe der Schliffbilder wurde anhand folgender Porenkenngrößen durchgeführt:

- Äquivalentdurchmesser EqD
- Fläche A
- Perimeter bzw. Umfang
- Feret_{max} und Feret_{min}
- Formfaktor f₀
- Formfaktor f₁

Diese beschreibenden Größen werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

Äquivalentdurchmesser EqD

Der Äquivalentdurchmesser einer unregelmäßig geformten Pore wird durch den Vergleich dessen Fläche mit der Fläche eines Kreises bestimmt.

$$EqD = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (1)$$

EqD: Äquivalentdurchmesser

A: Fläche

Fläche A

Die Fläche der Pore ist durch die Anzahl der segmentierten Pixel beschrieben.

$$A(X) = \sum_{i,j} g(x_i, y_j) \quad (2)$$

$g(x_i, y_j) = 1$ falls der entsprechende Pixel im Objekt X liegt

$g(x_i, y_j) = 0$ falls nicht

Perimeter

Der Perimeter bzw. der Umfang einer Pore wird in Avizo Fire 6.3 über die Anzahl der Punkte, welche am Rand des Objektes liegen und mindestens eine Null in der Umgebung haben bestimmt. Eine Null bedeutet, dass ein direkter Kontakt zur Matrix gegeben ist. Dies wird folgend an einem konkreten Beispiel deutlich gemacht.

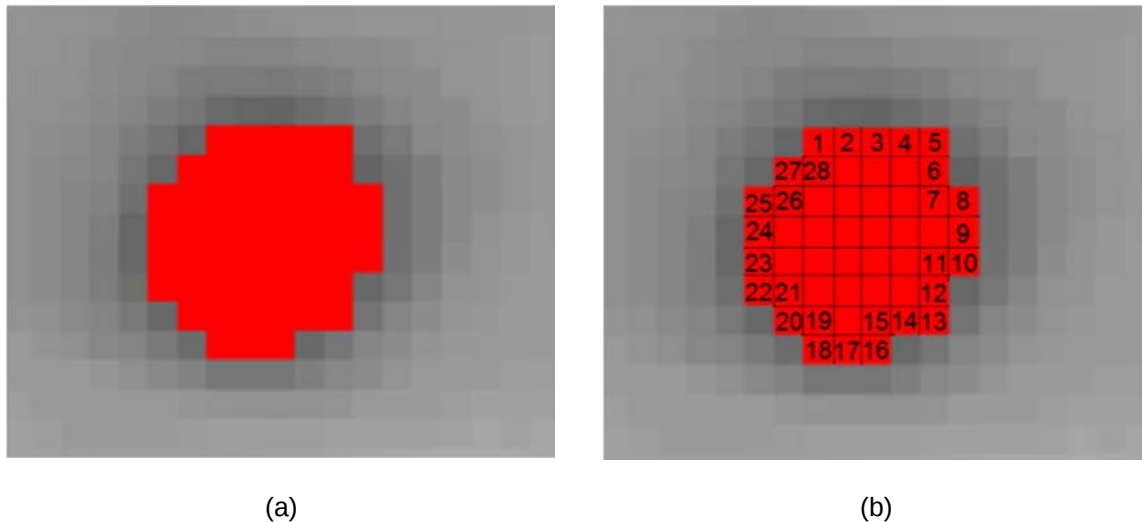


Bild 27: Vergrößerung einer runden segmentierten Pore des CT-Bildes, gemessen mittels Mikrofokusröhre bei 20 μm Voxelgröße. (a) segmentierte Pore, (b) segmentierte Pore mit Pixelgitter

In (b) ist eine vergrößerte segmentierte Pore mit Pixelgitter dargestellt. Alle Pixel die in direkter Grenze zur Matrix stehen sind nummeriert. In diesem Beispiel ist die Anzahl der Pixel, die die Bedingungen der Perimeterdefinition erfüllen 28. [6]

Feret_{max} und Feret_{min}

Voraussetzung für die Bestimmung des Feret_{max} ist der Feret - Durchmesser. Dieser wird über einen Bereich von 0-180° in jeweils 18°-Schritten durch anlegen zweier parallel zueinander liegender Geraden gemessen. Dies ist in Bild 48 beispielhaft für den Winkelbereich 0-90° dargestellt.

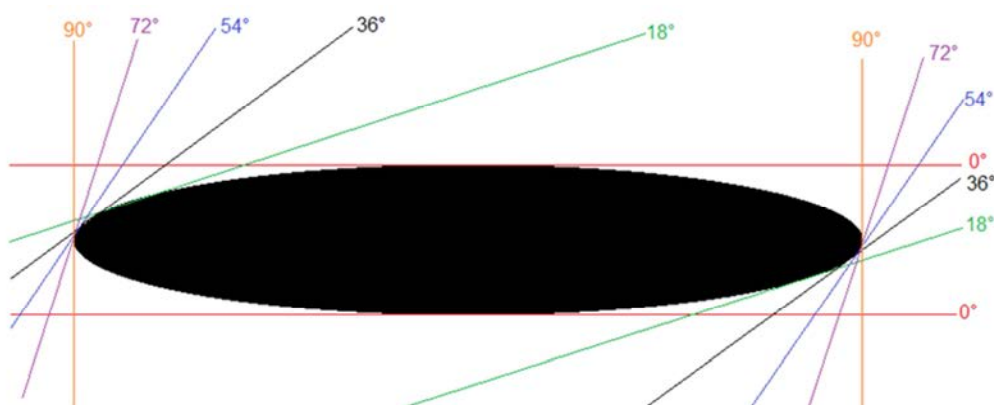


Bild 28: Messung des Feret-Durchmessers für den Winkelbereich 0-90°

Feret_{max} entspricht dem Maximum und Feret_{min} dem Minimum der 10 gemessenen Feret Durchmesser. [6]

Formfaktor f_0

Der Formfaktor f_0 wird durch das reziproke Verhältnis zwischen $feret_{\min}$ und $feret_{\max}$ bestimmt.

$$f_0 = \frac{1}{\frac{feret_{\min}}{feret_{\max}}} \quad (3)$$

$f_0 = 1$ falls die Maße identisch sind

$f_0 > 1$ falls nicht

Formfaktor f_1

Der Formfaktor f_1 ist ein Maß für die Abweichung von der Rundheit einer Pore, er unterscheidet jedoch nicht zwischen konkav und konvex.

$$f_1 = \frac{1}{\frac{4 \cdot \pi \cdot A}{P^2}} \quad (4)$$

$f_0 = 1$ falls die Pore ein Kreis ist

$f_0 > 1$ Abweichung eines Kreises

A: Fläche

P: Perimeter oder Umfang

Relative Abweichung

$$X_r = \left| \left(\frac{Y_{CT}}{Y_{LM}} \cdot 100\% \right) - 100 \right| \quad (5)$$

X_r : relative Abweichung

Y_{CT} : Größe Y (Fläche, Äquivalentdurchmesser, $Feret_{\max}$, $Feret_{\min}$, f_0 , f_1)
gemessen am CT-Slice

Y_{LM} : Größe Y (Fläche, Äquivalentdurchmesser, $Feret_{\max}$, $Feret_{\min}$, f_0 , f_1)
gemessen am Schliffbild

Der Ausdruck (5) gilt nur für eine Pore in einer untersuchten Ebene (Slice) und wird als Betrag gesetzt.

Absolute Abweichung

$$X_a = |Y_{CT} - Y_{LM}| \quad (6)$$

X_a : absolute Abweichung

Y_{CT} : Größe Y (Fläche, Äquivalentdurchmesser, Feret_{max}, Feret_{min}, f_0 , f_1)
gemessen am CT-Slice

Y_{LM} : Größe Y (Fläche, Äquivalentdurchmesser, Feret_{max}, Feret_{min}, f_0 , f_1)
gemessen am Schliffbild

Arithmetischer Mittelwert

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (7)$$

$\bar{X}$: arithmetischer Mittelwert

X_i : betrachtete Porenkenngröße

3.1.6 AP 7: Verifizierung des entwickelten CT-basierten Verfahrens durch Vergleich mit Lichtmikroskopie

Um die Güte des entwickelten CT-basierten Verfahrens einzuschätzen, wird an einer Vielzahl von Poren ein Vergleich mit durch Lichtmikroskopie gewonnen Werten durchgeführt. Dazu werden 3D-Volumen und Schliffbild einer VSG Avizo Fire - Bearbeitungskette unterzogen. Das 3D-Volumen wird ausgerichtet, an die Schliff-bildebene angepasst und ein neues CT-Slice-Vergleichsbild erzeugt (siehe Bild 29). CT-Slice und Schliffbilder werden segmentiert, binarisiert und ausgewertet.

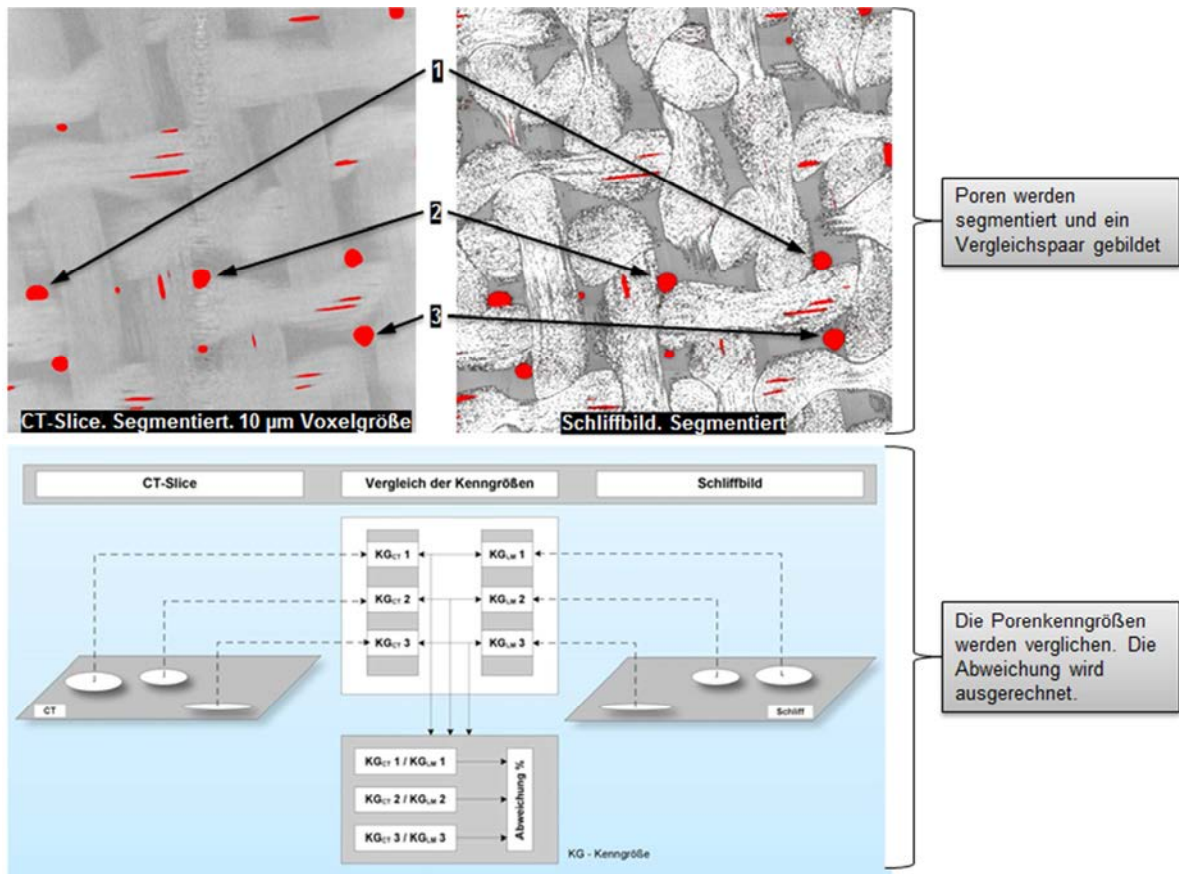


Bild 29: Schematische Darstellung des Vergleiches der Porenkenngrößen von CT-Slices und Schliffbildern.

Die Auswertung der Abweichung eines CT-Slice vom Schliffbild ist schematisch im Bild 29 dargestellt. Dabei werden mehrere identische Poren im CT-Slice und im Schliffbild ausgesucht, die Kenngrößen (Fläche, Umfang, Formfaktoren usw.) extrahiert und miteinander verglichen. Das Resultat dieses Vergleiches ist die relative Abweichung der Porenkenngrößen eines CT-Slices vom Schliffbild. Diese Abweichung wird als relativer Fehler beim Verifizieren der CT-Aufnahmen angegeben.

3.1.6.1 Klassifizierung der Proben nach Porengeometrie

In allen untersuchten Proben haben sich typische Porengeometrien herauskristallisiert. Die Verifizierung und der Vergleich erfolgten am Beispiel der Gewebe-Proben. Die in den Gewebe-Proben vorkommenden Porentypen werden im Folgenden entsprechend ihrer Geometrie klassifiziert und die Abweichungen der Porenkenngrößen wurden für die unterschiedlichen Klassifizierungen betrachtet.

Es haben sich in den Gewebe-Proben zwei typische Porengeometrien herauskristallisiert:

- runde Poren
- längliche Poren

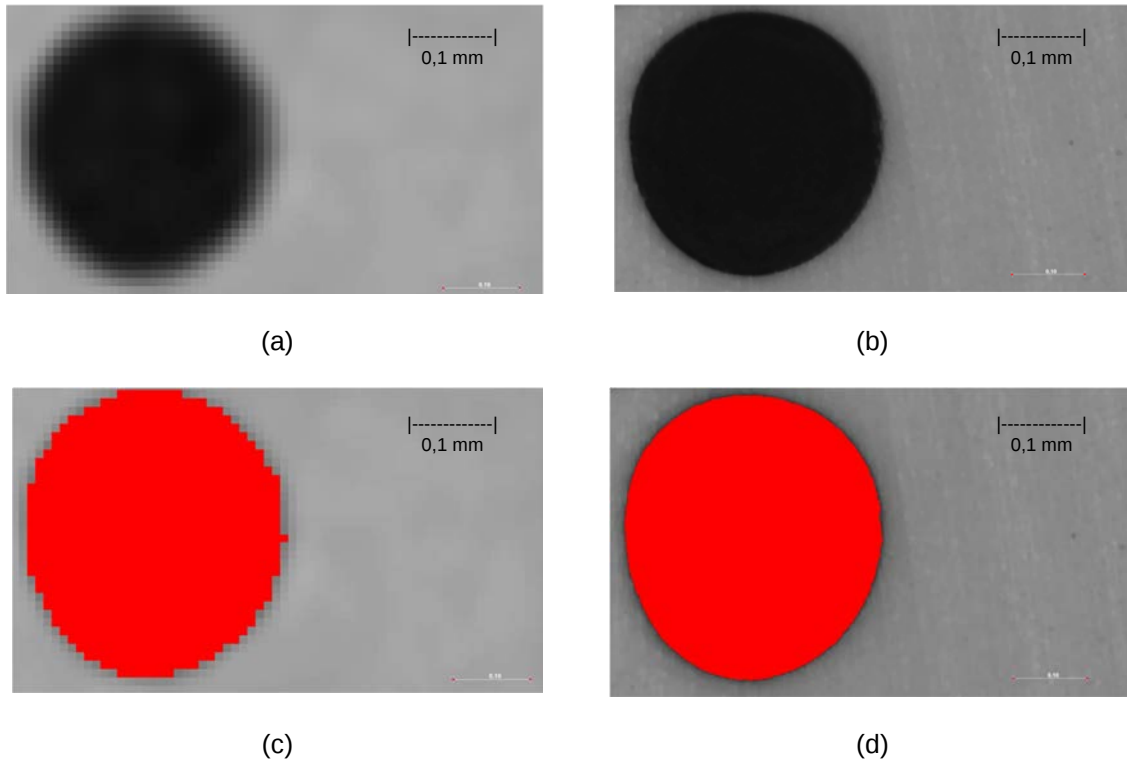


Bild 30: Gegenüberstellung von CT-Slice und Schliffbild. Vergrößerung einer runden Pore. 10 µm. Mikrofokusröhre. (a) CT-Slice, (b) Schliffbild, (c) segmentierter CT-Slice, (d) segmentiertes Schliffbild

In Bild 30 und Bild 31 ist die Vergrößerung einer einzelnen Pore dargestellt. Links sind jeweils die CT-Aufnahmen und rechts die analogen Schliffbilder. Die Notwendigkeit, die CT-Schnittbilder der gezielten Schliffpräparation gegenüberzustellen ist sofort ersichtlich. Der Schwellenwert kann annäherungsweise gewählt werden, jedoch wird mit zunehmender Voxelgröße der Randbereich der Pore immer kontrastärmer.

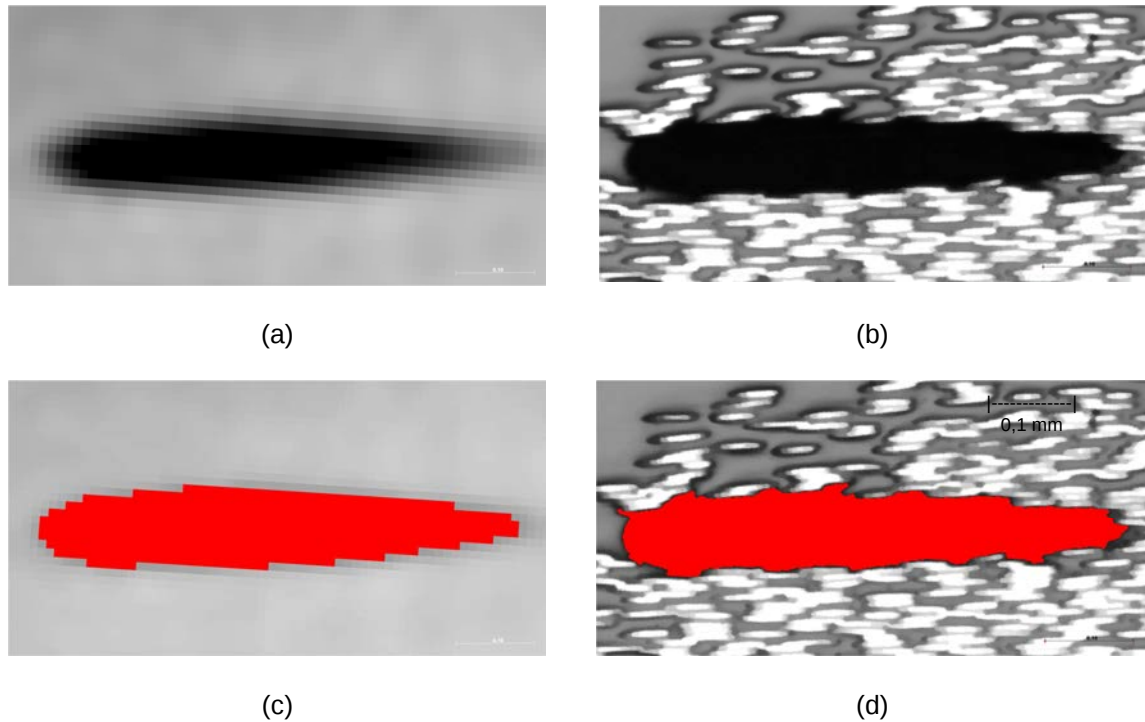


Bild 31: Gegenüberstellung von CT-Slice und Schliffbild. Vergrößerung einer länglichen Pore. 10 μm . Mikrofokusröhre. (a) CT-Slice, (b) Schliffbild, (c) segmentierter CT-Slice, (d) segmentiertes Schliffbild

Auf Grund der unterschiedlichen Porengeometrien braucht man zur Einteilung verschiedene Ansätze. Als Grundlage für die Klassifizierung runder Poren wird der Äquivalente Durchmesser gewählt.

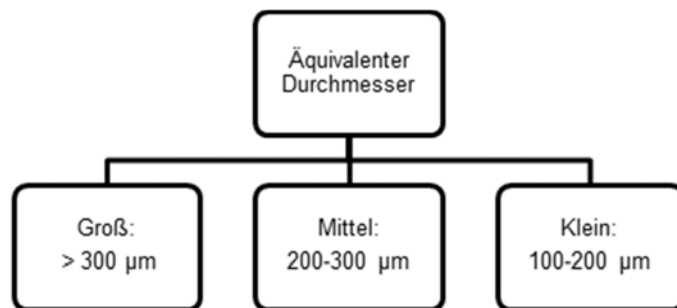


Bild 32: Klassifizierung für runde Poren.

Empirisch erweist sich eine Einteilung in 3 Klassen, wie in Bild 32 dargestellt als sinnvoll, da nahezu alle runden Poren somit erfasst werden können.

Bezüglich der Einteilung der länglichen bzw. elliptischen Poren wird die Größe $Feret_{min}$ herangezogen und analog zur Klassifizierung der runden Poren in 3 sinnvolle Klassen unterteilt.

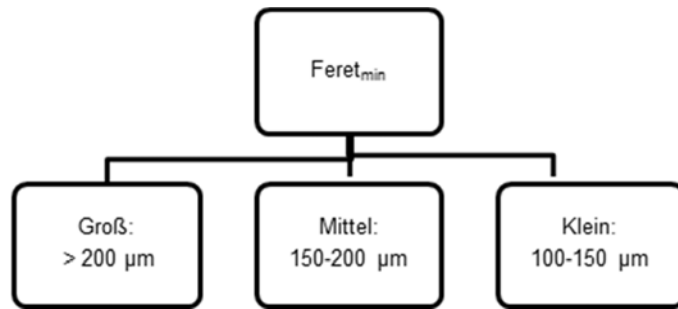


Bild 33: Klassifizierung für längliche Poren.

Die Klasse „klein“ beginnt bei beiden Porentypen bei 100 µm, da eine aussagekräftige Auswertung erst ab einer 10-fachen Voxelgröße möglich ist. An Hand dieser Einteilung werden fast alle vorkommenden Porengrößen berücksichtigt.

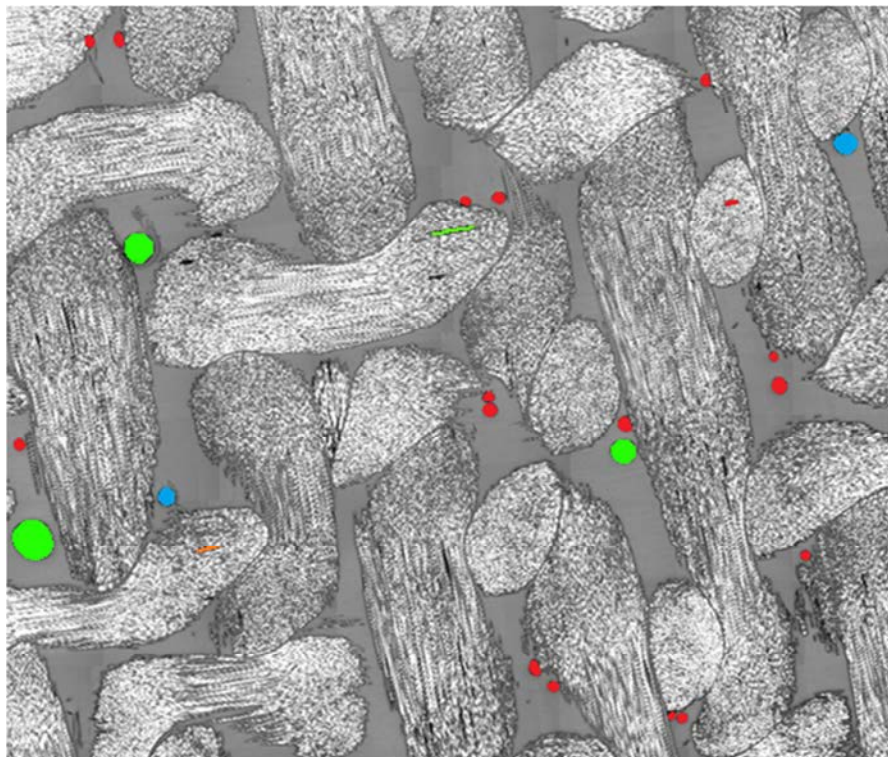


Bild 34: Schliffbild. 50-fache Vergrößerung.

Bild 34 repräsentiert die typisch vorkommenden Poren. Wie zu erkennen ist, sind die runden Poren stets in der Matrix und die länglichen Poren in den Rovings lokalisiert. Zur Visualisierung sind die Poren entsprechend ihrer Klassifizierung farblich markiert. Grün markiert sind die Poren der Klasse Groß, blau entspricht der Klasse Mittel und rot repräsentieren die kleinen Poren.

3.1.6.2 Relative Abweichung bei einer Voxelgröße von 10 μm

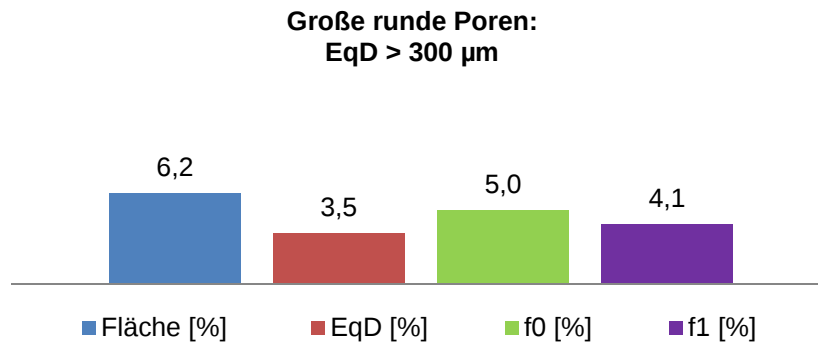


Bild 35: Relative Abweichung für große runde Poren. 10 μm

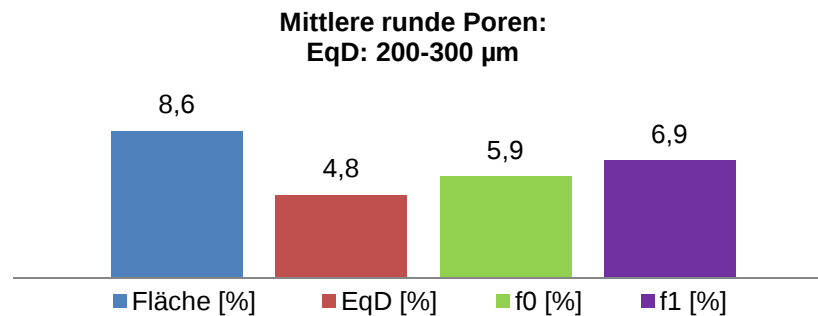


Bild 36: Relative Abweichung für mittlere runde Poren. 10 μm

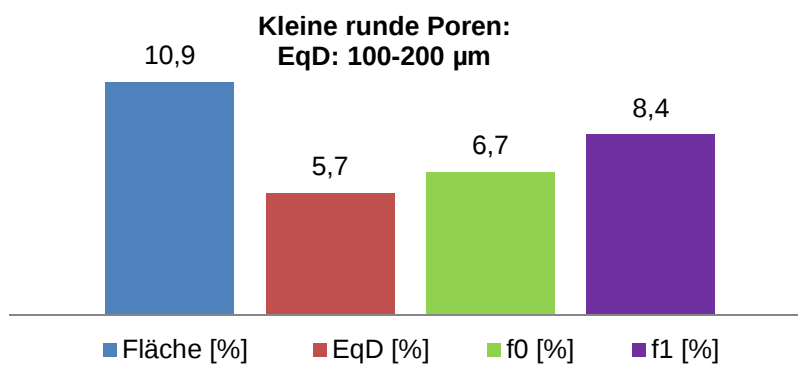


Bild 37: Relative Abweichung für kleine runde Poren. 10 μm

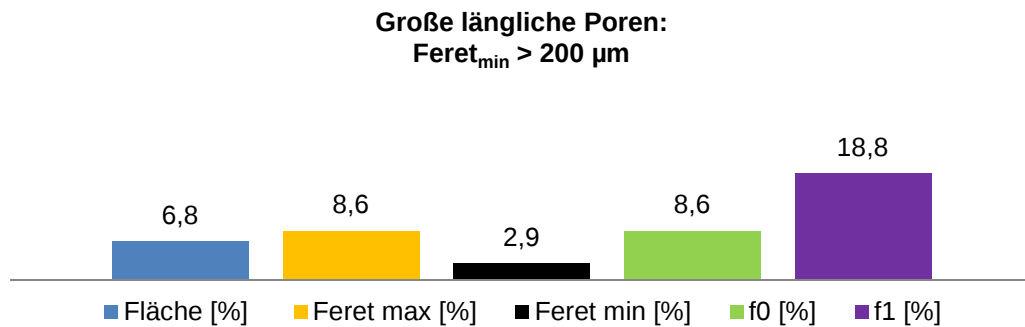


Bild 38: Relative Abweichung für große längliche Poren. 10 µm

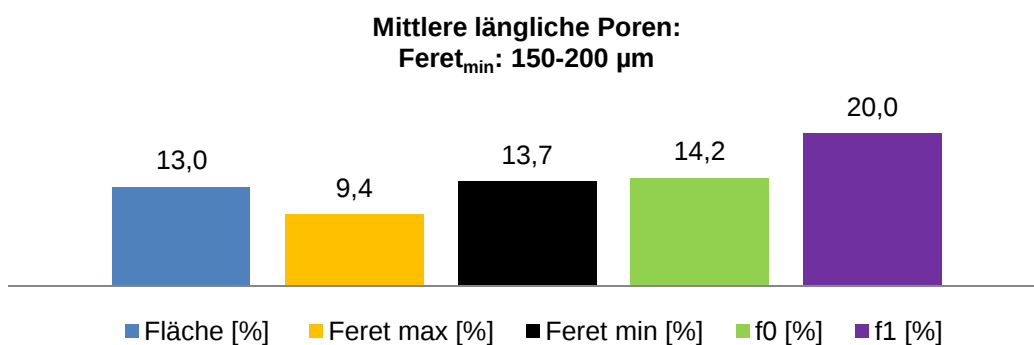


Bild 39: Relative Abweichung für mittlere längliche Poren. 10 µm

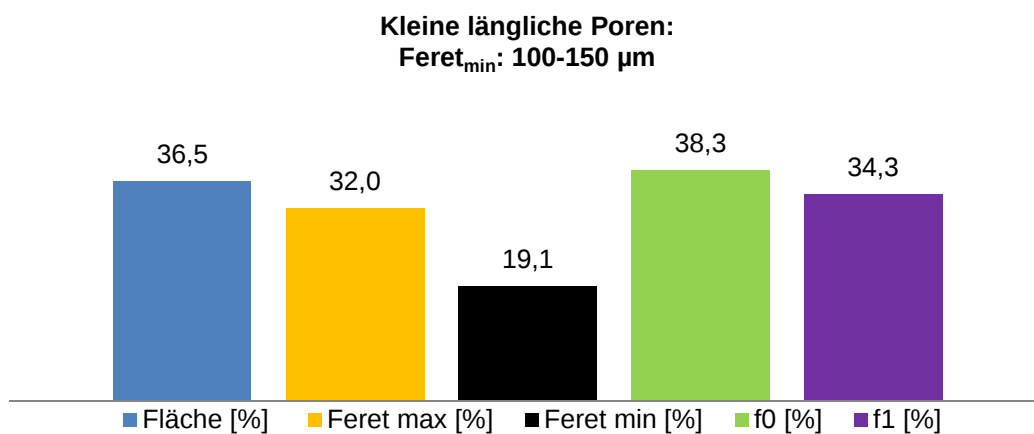


Bild 40: Relative Abweichung für kleine längliche Poren. 10 µm

3.1.6.3 Relative Abweichung bei einer Voxelgröße von 20 μm

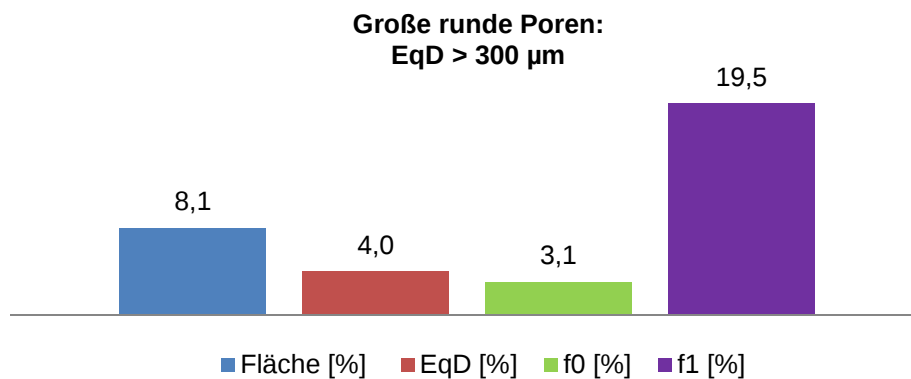


Bild 41: Relative Abweichung für kleine längliche Poren. 20 μm

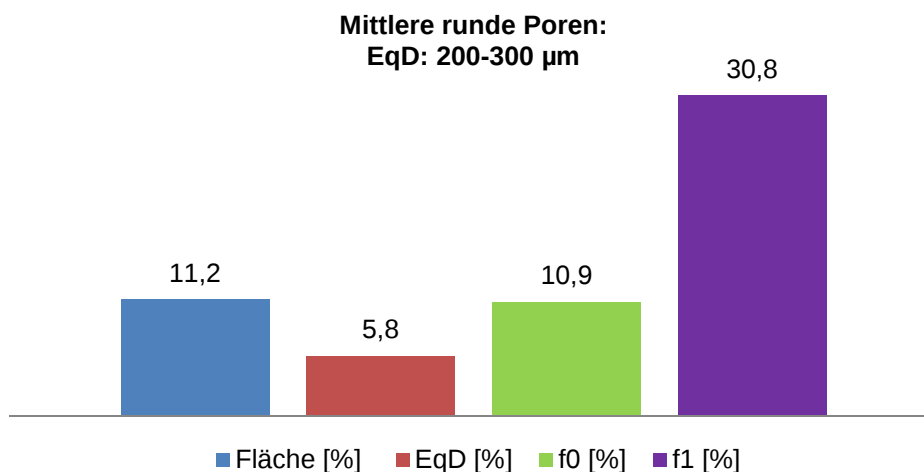


Bild 42: Relative Abweichung für mittlere runde Poren. 20 μm

Da das Kriterium für eine quantitative Bestimmung das 10-fache der Voxelgröße ist, können bei einer CT-Aufnahme mit einer Voxelgröße von 20 μm nur die großen und mittleren runden Poren sinnvoll bewertet werden.

3.1.6.4 Quantitative Bestimmung des Porengehaltes

Auf der Basis der, in der vorgelegten Untersuchungen ermittelten Schwellwerten kann nun die Porosität mit Hilfe von Volumen der Poren ermittelt werden. Das 3D-Volumen wird einer Verarbeitungskette von Avizo unterzogen und anschließend segmentiert. Die verwendeten Funktionen in Avizo wie „SurfaceGen“ und „SurfaceView“ ermöglichen die Visualisierung.

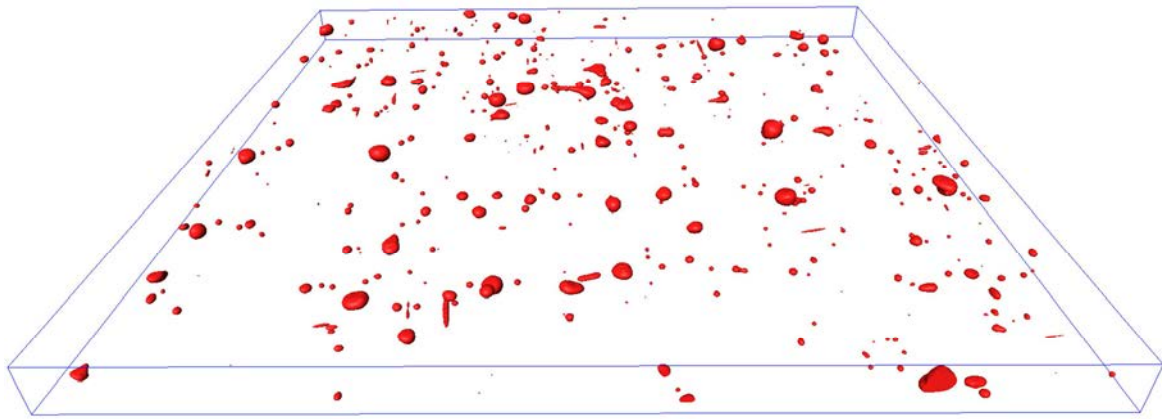


Bild 43: 3D-Darstellung der Porosität in einer Gewebe-CFK-Probe. Aufgenommen mittels Mikrofokusröhre mit 20 μm Voxelgröße. Poren sind rot dargestellt. Faser und Matrix sind ausgeblendet.

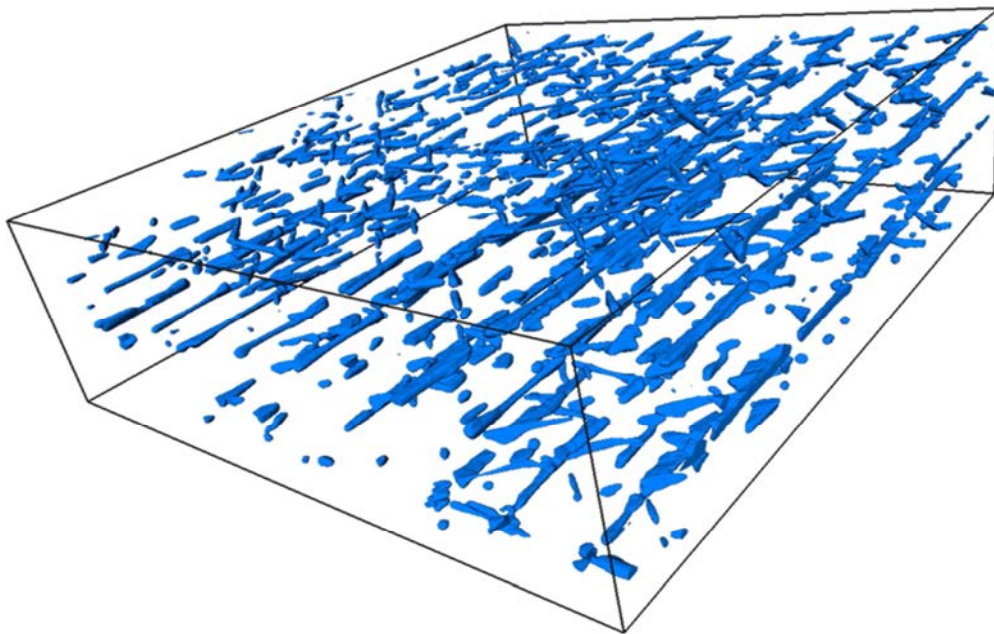


Bild 44: 3D-Darstellung der Porosität in einer Gelege-CFK-Probe. Aufgenommen mittels Mikrofokusröhre mit 20 μm Voxelgröße. Poren sind blau dargestellt. Matrix und Fasern sind ausgeblendet.

Im Bild 43 und Bild 44 kann eine Segmentierung im 3D-Volumen sichtbar gemacht werden. Die offen gelegten Poren können nach verschiedenen Kriterien (Form, Größe) visuell beurteilt werden. Man erkennt z.B., dass die länglichen Poren nur in Richtung der Faser in unterschiedlichen Tiefenlagen sich befinden. Die großen runden Poren sind meistens mit den anderen Poren in ihrer Umgebung verbunden und weisen damit größere Werte für Shape factor. Anschließend führt die 3D-Segmentierung der CFK-Proben zur Ermittlung der Volumenporosität.

3.2 Vorgehen und Ergebnisse des Arbeitsblocks 2: Einfluss der Prozessparameter beim RTM-Verfahren

Die Inhalte und Ergebnisse der zu diesem Arbeitsblock gehörenden Arbeitspakete wurden im Verlaufe der Arbeit angepasst. Die Ergebnisse sind im folgenden Schema beschrieben:

3.2.1 Variation der Prozessparameter beim RTM – Prozess

Generell können im RTM – Prozess folgende Parameter variiert werden:

- Werkzeugtemperatur
- Harztemperatur
- Injektionsdruck
- Injektionsgeschwindigkeit
- Schussgewicht
- Vakuum

Die Harztemperatur wurde jedoch nicht variiert, da das Harz sobald es die Kavität erreicht rasch die Temperatur des Werkzeuges annimmt. Dies wurde somit über eine Veränderung der Werkzeugtemperatur untersucht. Insgesamt wurden 8 Versuchsbauteile hergestellt.

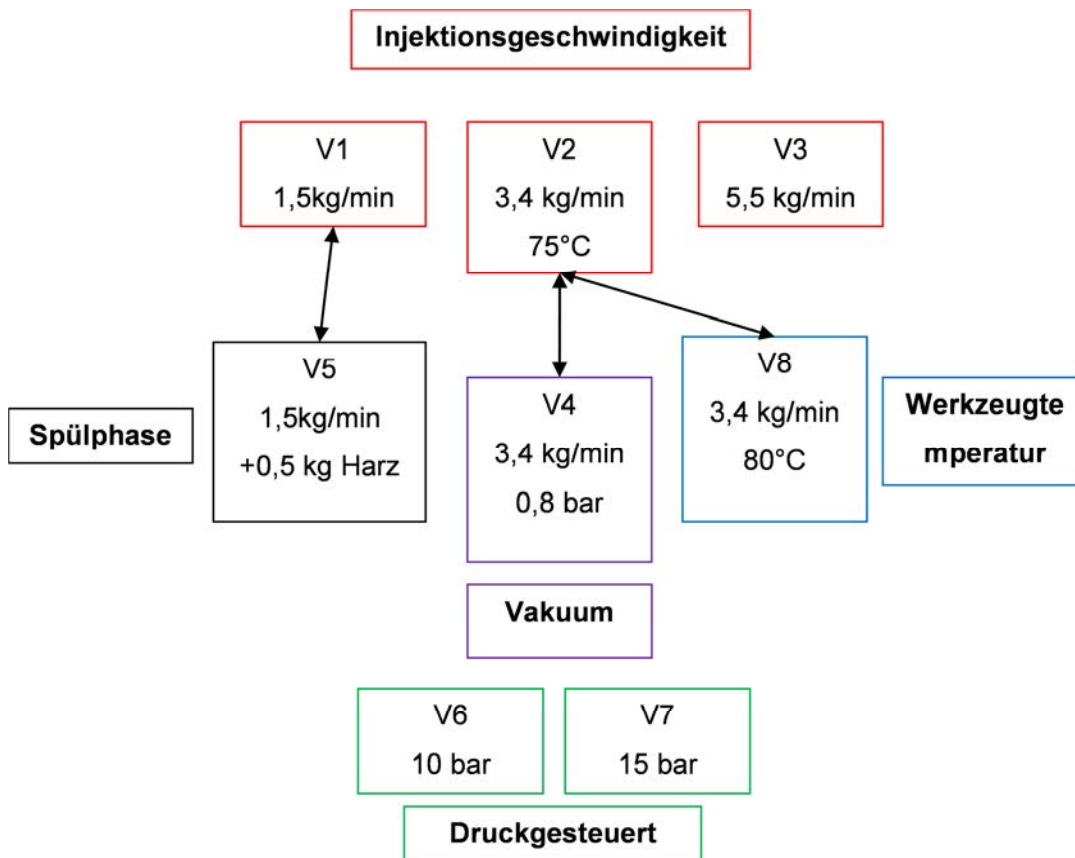
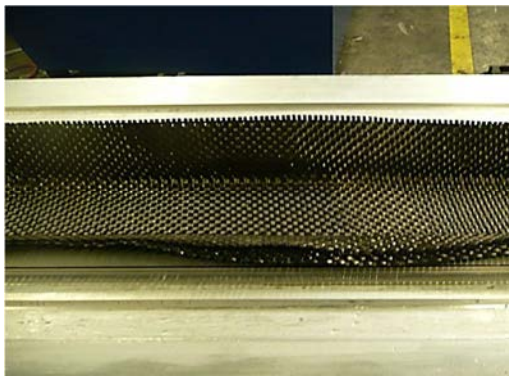


Bild 45: Schematische Darstellung der durchgeführten Versuche.

3.2.2 Probenherstellung und Entnahme

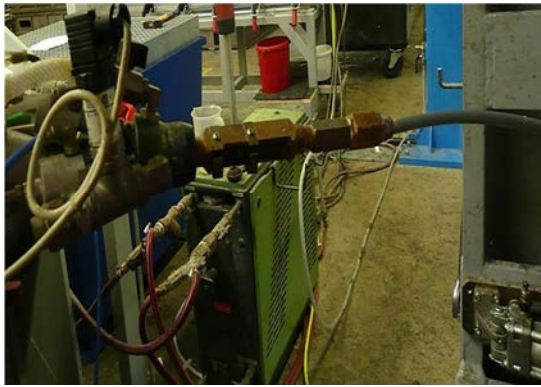
Im Rahmen des Projektes wurden alle Probeteile bei C.F. Maier Europlast im Rahmen von Studien-, Praxissemester- und Bachelorarbeiten selbst hergestellt, um sich mit dem HP-RTM Prozess vertraut zu machen und mögliche Fehlerquellen zu analysieren. Die Versuchsbauteile sind mit einem Gewebe mit Leinwandbindung 1/1 hergestellt worden welches ein Flächengewicht von 600 g/m^2 hat. Als Matrix wurde ein Epoxidharz gewählt.



(a)



(b)



(c)



(d)

Bild 46: Schematischer Ablauf der Probenherstellung

- (a) Drapieren des Kohlenstofffasergewebes,
- (b): Schließen des Werkzeugs,
- (c) Injektion des Harzes und Aushärtung,
- (d) Öffnen des Werkzeuges und Entnahme des Bauteils

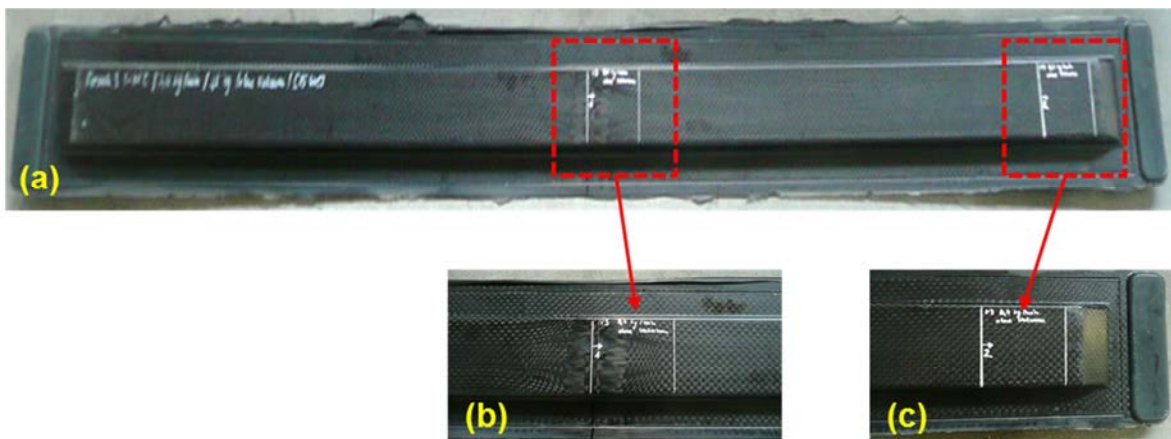


Bild 47: Probenentnahme.

- (a) gesamte Probe,
- (b) Position1: Ort des Harzzuflusses (Injektionspunkt),
- (c) Position 2: Ort des Harzabflusses (Steigerpunkt)

Bei der Durchführung der beschriebenen Versuche zeigte sich, dass die Porosität am Injektionspunkt meist geringer als am Steigerpunkt ist. Aus diesem Grund wurden, wie in Bild 47 dargestellt, pro Versuchsbauteil zwei Proben entnommen. Die Abmessung der Proben beträgt 75 x 80 x 2 mm. Nachkommend werden die Positionen 1 oder 2 wie folgt angegeben:

- Versuch x/ Position y, abgekürzt Vx/Py.

wobei die Position1 dem Injektionspunkt und Position 2 dem Steigerpunkt entspricht.

3.2.3 AP 8: Einfluss der Injektionsgeschwindigkeit auf die Porosität (mikro-CT)

Bei der Untersuchung des Einflusses der Injektionsgeschwindigkeit auf die Ausbildung von Porosität in CFK-Versuchsbauteilen wurden unterschiedliche Parameter, die in der nachfolgenden Tabelle dargestellt sind angewendet. In den anschließenden Kapiteln sind die Ergebnisse dieser Parametervariationen dargestellt.

Tabelle 2: Prozessparameter bei unterschiedlicher Injektionsgeschwindigkeit

Prozessparameter	V1	V2	V3
Werkzeugtemperatur	75 °C	75 °C	75 °C
Harztemperatur	65 °C	65 °C	65 °C
Regeldruck	15 bar	15 bar	15 bar
Injektionsgeschwindigkeit	1,5 kg/ min	3,4 kg/min	5,5 kg/ min
Schussgewicht	1,5 kg	1,5 kg	1,5 kg
Vakuum	---	---	---

3.2.3.1 Niedrige Injektionsgeschwindigkeit - 1,5 kg/min

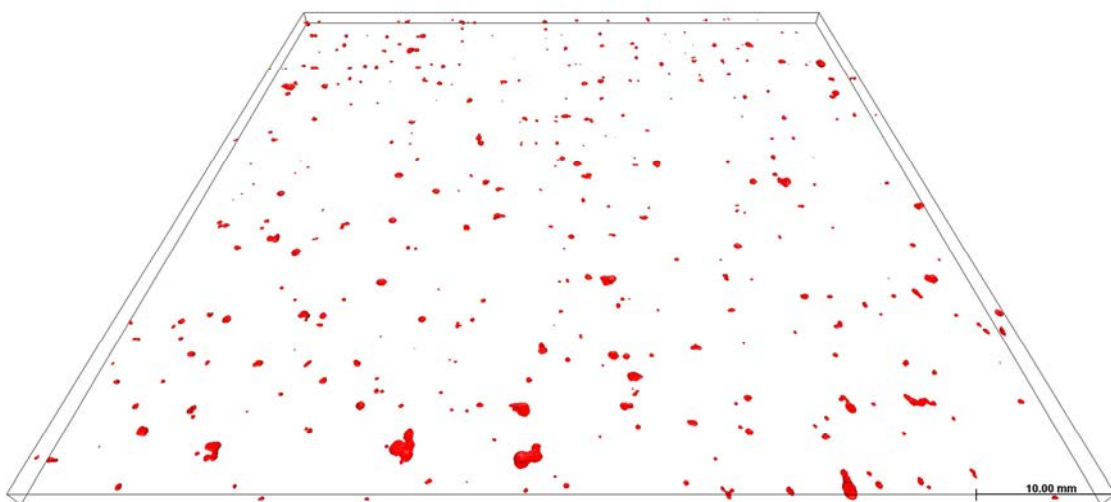


Bild 48: 3D-Darstellung der Probe V1/1. Injektionsgeschwindigkeit von 1,5 kg/min. Volumenporosität: 0,13 %. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre)

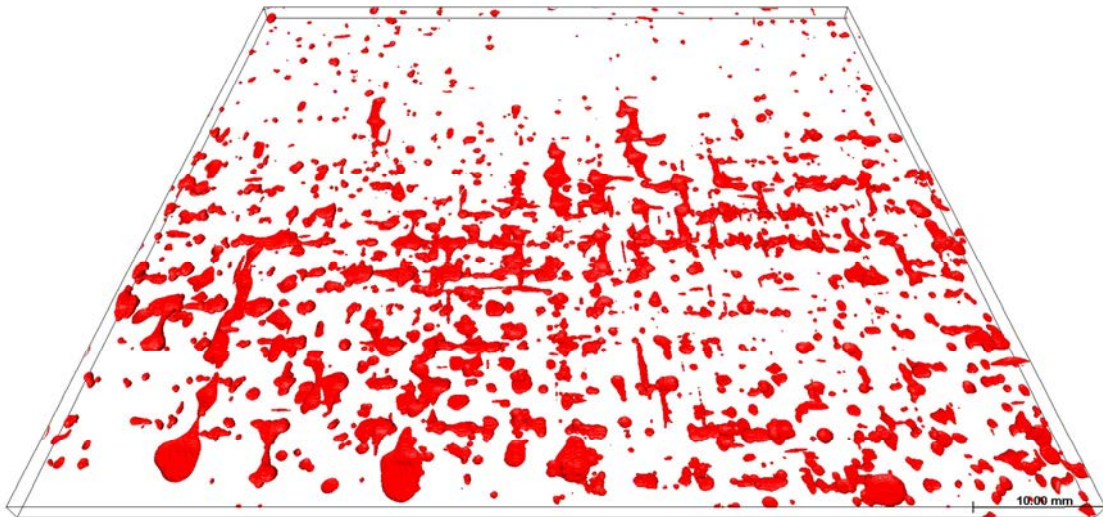


Bild 49: 3D-Darstellung der Probe V1/2. Injektionsgeschwindigkeit von 1,5 kg/min. Volumenporosität: 2,69 %. 60 μm Voxelgröße (Mikrofokusröhre)

3.2.3.2 Mittlere Injektionsgeschwindigkeit - 3,4 kg/min

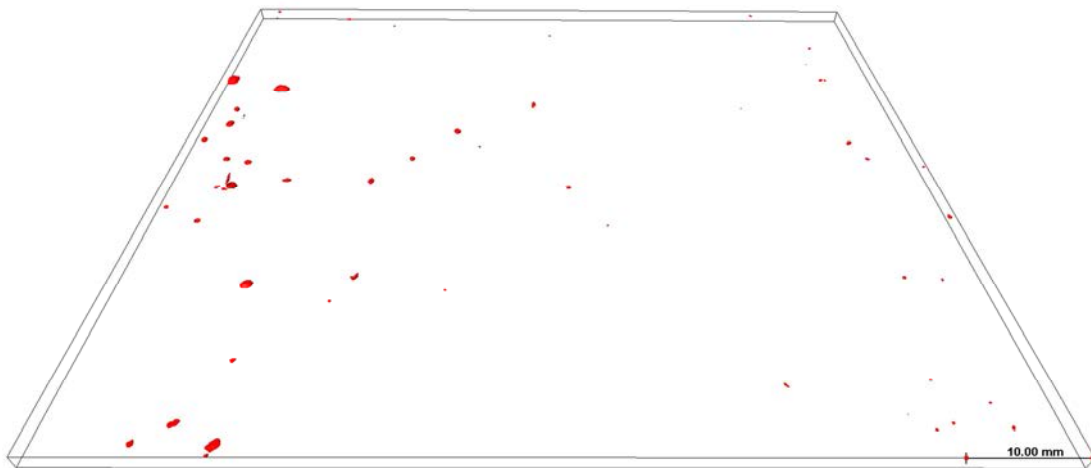


Bild 50: 3D-Darstellung der Probe V2/1. Injektionsgeschwindigkeit von 3,4 kg/min. Volumenporosität: 0,03%. 60 μm Voxelgröße (Mikrofokusröhre)

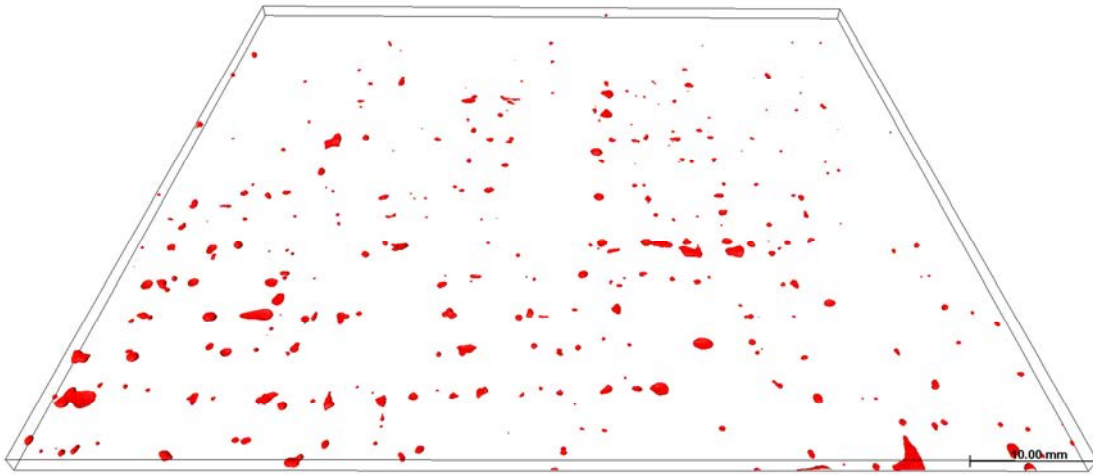


Bild 51: 3D-Darstellung der Probe V2/2. Injektionsgeschwindigkeit von 3,4 kg/min. Volumenporosität: 0,21 %. 60 μm Voxelgröße (Mikrofokusröhre)

3.2.3.3 Hohe Injektionsgeschwindigkeit - 5,5 kg/min

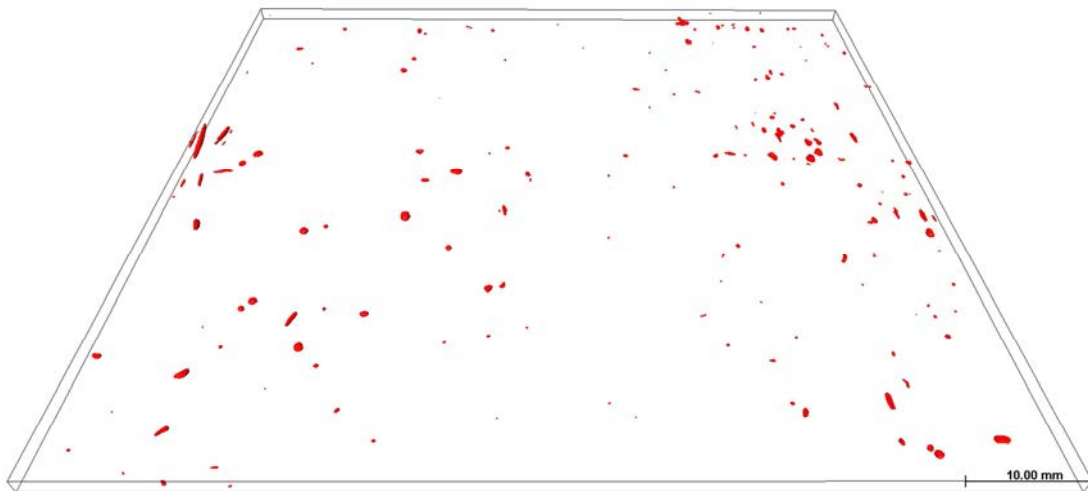


Bild 52: 3D-Darstellung der Probe V3/1. Injektionsgeschwindigkeit von 5,5 kg/min. Volumenporosität: 0,08 %. 60 μm Voxelgröße (Mikrofokusröhre)

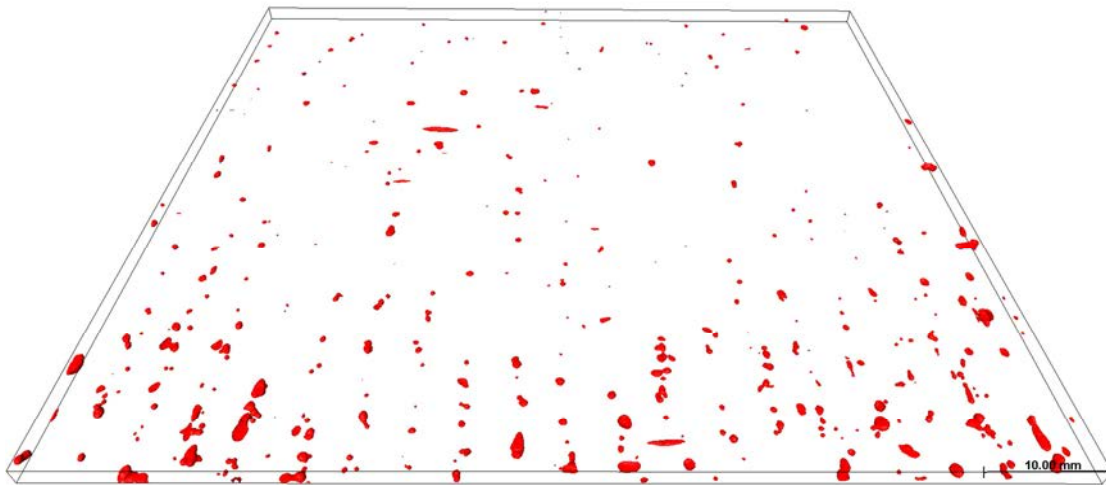


Bild 53: 3D-Darstellung der Probe V3/2. Injektionsgeschwindigkeit von 5,5 kg/min. Volumenporosität: 0,21 %. 60µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre)

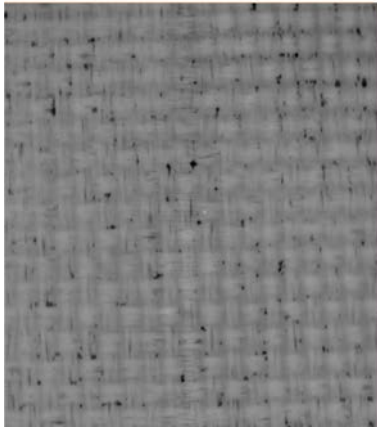
3.2.4 Einfluss der Injektionsgeschwindigkeit auf die Porosität und das Gewebe

Die geringste Volumenporosität wurde bei einer Injektionsgeschwindigkeit von 3,4 kg/min erzielt. Sowohl an Position 1 als auch an Position 2 wie in zusammengestellt. Mit 0,13 % an Position 1 und 2,69 % Porosität an Position 2 ist das Versuchsbauteil 3, welches mit einer Geschwindigkeit von 1,5 kg/min injiziert wurde das poröseste.

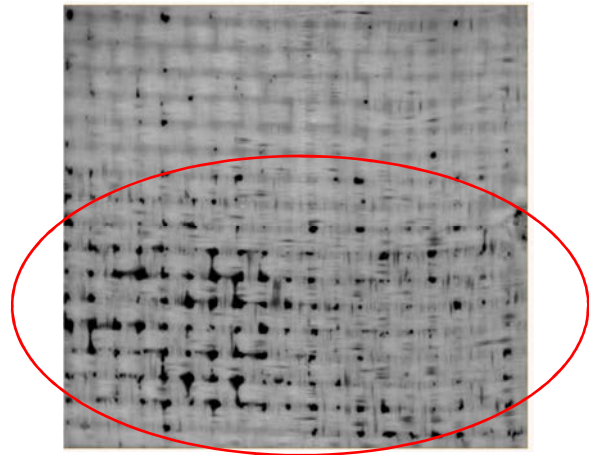
Tabelle 3: Gegenüberstellung Porositätsgehalt V1/ V2/ V3

Probe	1,5 kg/min (V1)	3,4 kg/min (V2)	5,5 kg/min (V3)
Volumenporosität in [%] Position 1	0,13	0,03	0,08
Volumenporosität in [%] Position 2	2,69	0,21	0,21

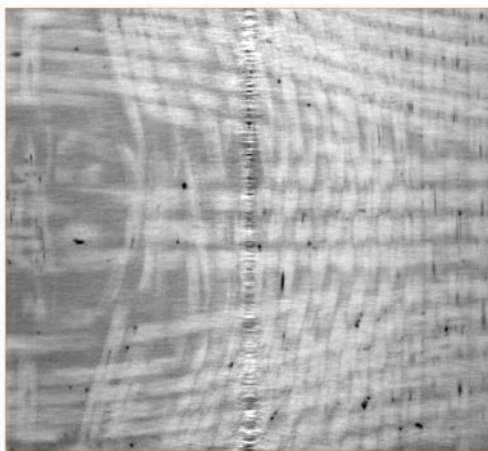
Durch die Injektionsgeschwindigkeit von 5,5 kg/min und 3,4 kg/min entsteht ein ausreichend hoher Forminnendruck um das Gewebe in der Kavität stark zu verschieben (siehe Bild 54(c)-(f)). Nur bei Versuchsbauteil 1, das mit 1,5 kg/min injiziert wurde, ist das nicht der Fall (siehe Bild 54(a), (b)).



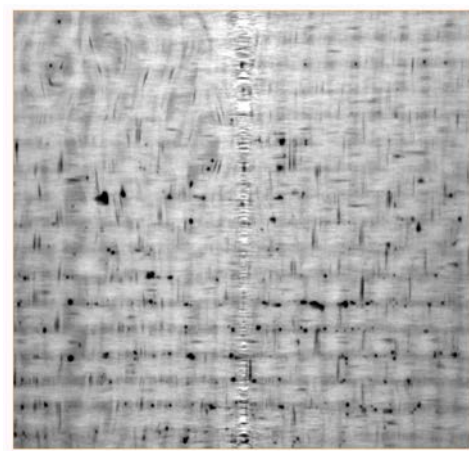
(a)



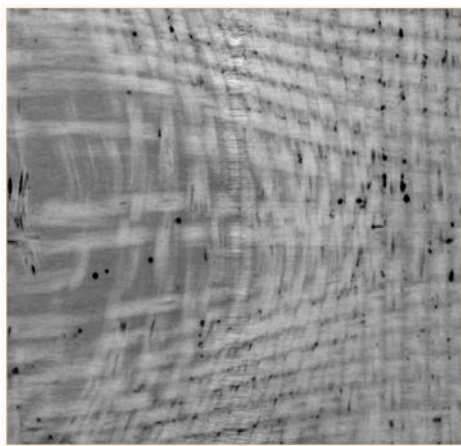
(b)



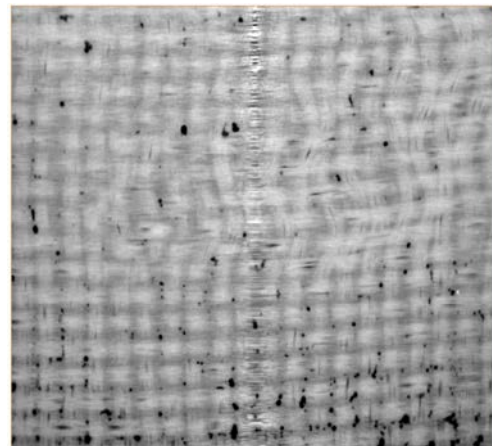
(c)



(d)



(e)



(f)

Bild 54: Gegenüberstellung der CT-Slices aus der Mitte der Z-Achse

1,5 kg/min: (a) V1/1, (b) V1/2

3,4 kg/min: (c) V2/1, (d) V2/2,

5,5 kg/min: (e) V3/1, (f) V3/2,

Auffällig bei V1/P2 ist die Abweichung der Volumenporosität im oberen Bereich zum unteren Bereich (rote Ellipse in Bild 54(b)). Betrachtet man (d) und (f) findet man die gleiche Tendenz. Besonders deutlich ist dies in der 3D-Darstellung. Im porenarmen Bereich findet man zudem eine Verschiebung des Gewebes. Vorstellbar ist, dass sich das Harz-Härter-Gemisch in dieser Zone den Weg des geringsten Widerstandes sucht und diesen bis zum Steigerpunkt verfolgt, tritt dann der Kunststoff aus bleibt die eingeschlossene Luft in der Kavität zurück.

3.2.5 AP 9: Einfluss der Werkzeugtemperatur auf die Porosität (mikro-CT)

Bei der Untersuchung des Einflusses der Werkzeugtemperatur auf die Ausbildung von Porosität in CFK-Versuchsbauteilen wurden verschiedene Parameter, die in der nachfolgenden Tabelle dargestellt sind angewendet. In den anschließenden Kapiteln sind die Ergebnisse dieser Parametervariationen dargestellt.

Tabelle 4: Prozessparameter bei unterschiedlicher Werkzeugtemperatur

Prozessparameter	V8	V3
Werkzeugtemperatur	80 °C	75 °C
Harztemperatur	65 °C	65 °C
Injektionsdruck	15 bar	15 bar
Injektionsgeschwindigkeit	3,4 kg/min	3,4 kg/min
Schussgewicht	1,5 kg	1,5 kg
Vakuum	---	---

3.2.5.1 Höhere Temperatur: 80°C

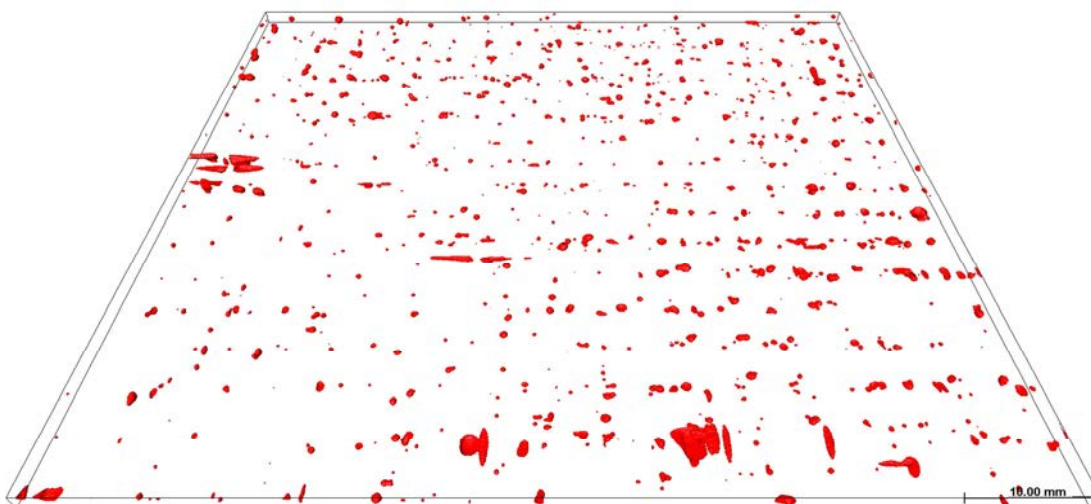


Bild 55: 3D-Darstellung der Probe V8/1. Werkzeugtemperatur von 80°C. Volumenporosität: 0,54%. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre)

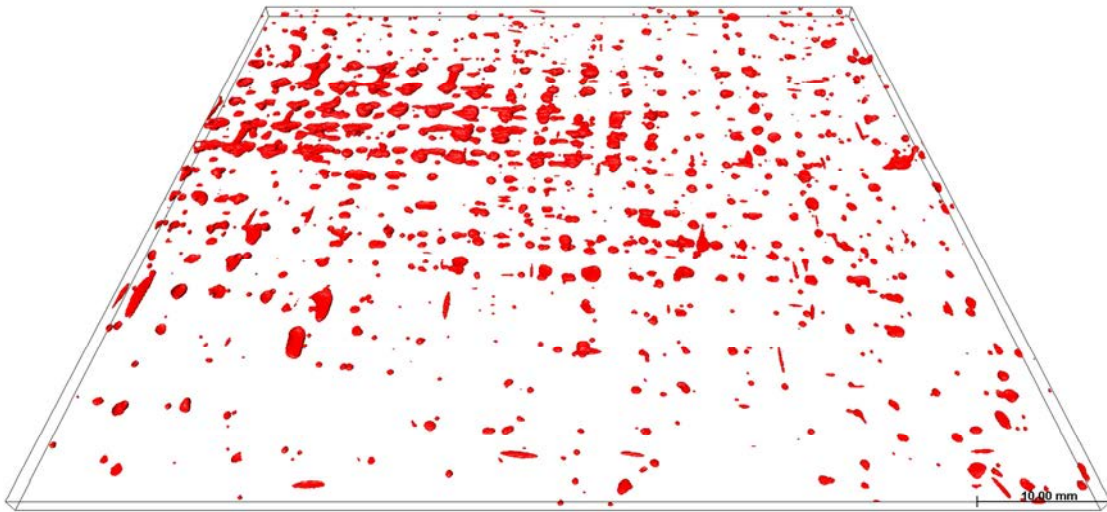


Bild 56: 3D-Darstellung der Probe V8/2. Werkzeugtemperatur von 80°C. Volumenporosität: 2,54%. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre)

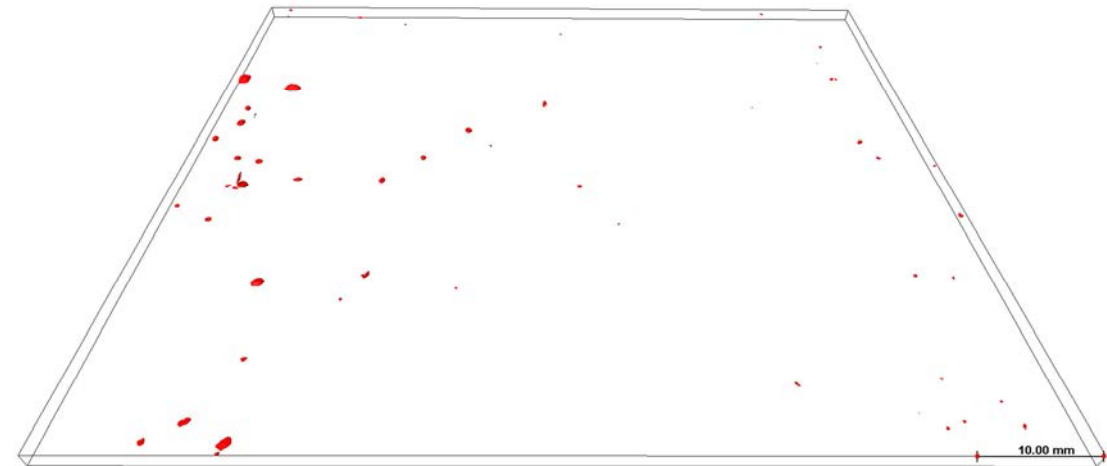


Bild 57: 3D-Darstellung der Probe V2/1. Werkzeugtemperatur von 75°C. Volumenporosität: 0,03 %. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre)

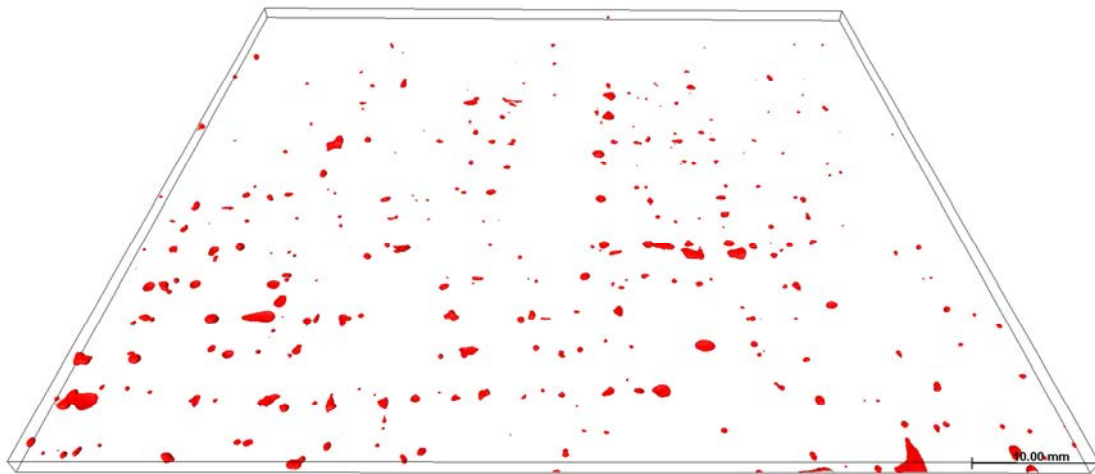


Bild 58: 3D-Darstellung der Probe V2/2. Werkzeugtemperatur von 75°C. Volumenporosität: 0,21 %. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre)

3.2.6 Einfluss der Werkzeugtemperatur auf die Porosität und das Gewebe

Die Erhöhung der Werkzeugtemperatur um 5°C hat keine Minimierung der Volumenporosität bezweckt. In Tabelle 5 sind die Porositätsgehalte gegenübergestellt.

Tabelle 5: Gegenüberstellung Porositätsgehalt V8/ V2

Probe	80 °C (V8)	75 °C (V2)
Volumenporosität [%] Position 1	0,54	0,03
Volumenporosität [%] Position 2	2,54	0,21

Aufgrund der höheren Temperatur sinkt die Viskosität des Harzes und führt wohl dazu, dass sich keine ideale Fließfrontgeschwindigkeit einstellt. Es scheint als ob das Harz an den Fasern entlang vor eilt und die verbleibende Luft zwischen Schuss- und Kettfaden einschließt. An der Position 2 der Probe 8 ist über einen großen Bereich (siehe Bild 59(b) rote Ellipse) nicht ausreichend Harz vorhanden.

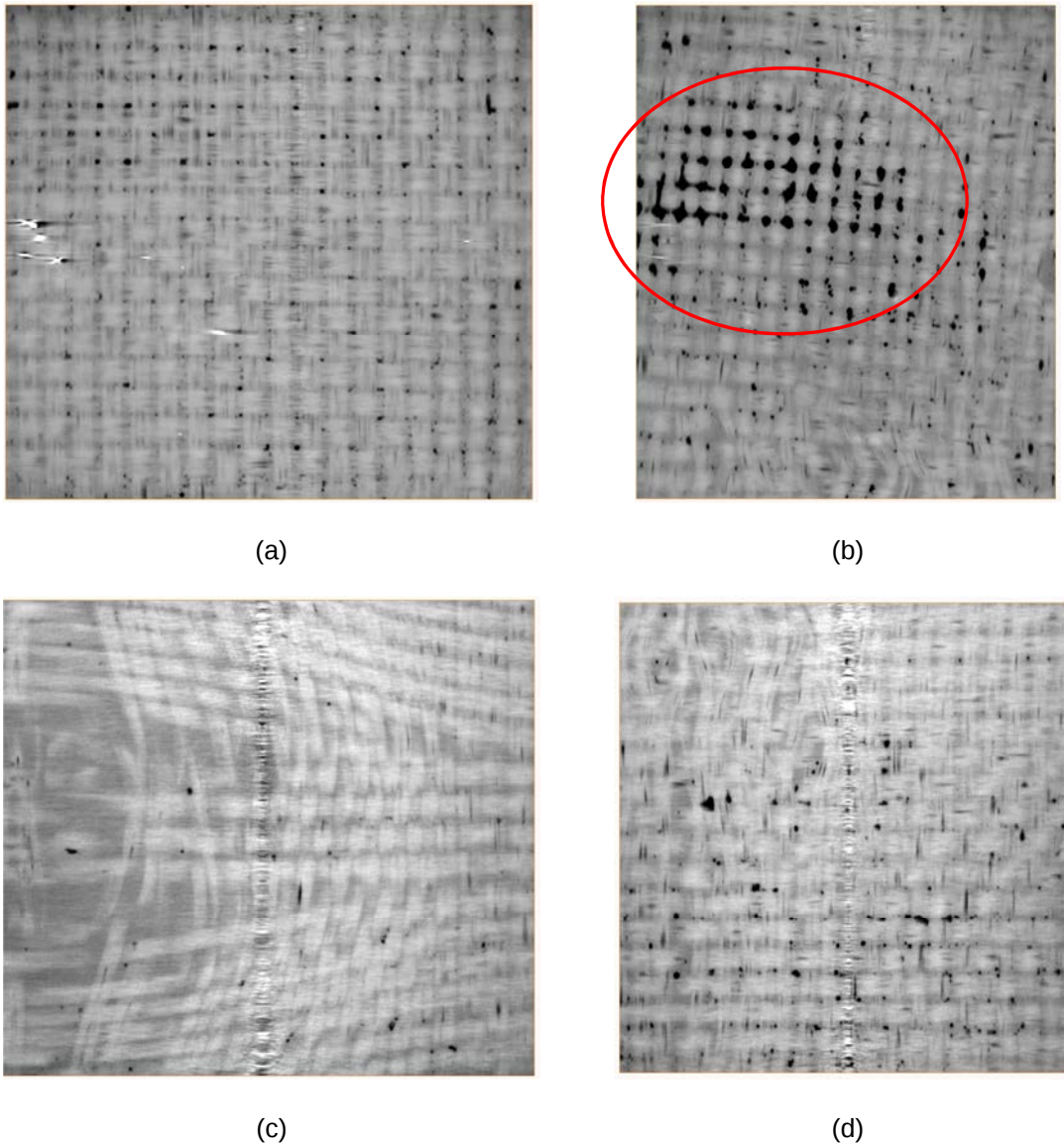


Bild 59: Gegenüberstellung der CT-Slices aus der Mitte der Z-Achse

Werkzeugtemperatur [80°C]: (a) V8/1, (b) V8/2,
Werkzeugtemperatur [75°C]: (c) V2/1, (d) V2/2

3.2.7 AP 10: Einfluss des Injektionsdrucks auf die Porosität (mikro-CT)

Bei der Untersuchung des Einflusses des Injektionsdrucks auf die Ausbildung von Porosität in CFK-Versuchsbauteilen wurden verschiedene Parameter, die in der nachfolgenden Tabelle dargestellt sind angewendet. In den anschließenden Kapiteln sind die Ergebnisse dieser Parametervariationen dargestellt.

Tabelle 6: Prozessparameter bei unterschiedlichem Druck

Prozessparameter	V6	V7
Werkzeugtemperatur	75 °C	75 °C
Harztemperatur	65 °C	65 °C
Regeldruck	10 bar	15 bar
Injektionsgeschwindigkeit	5,5 kg/min	5,5 kg/min
Schussgewicht	1,5 kg	1,5 kg
Vakuum	---	---

3.2.7.1 Niedriger Druck – 10 bar

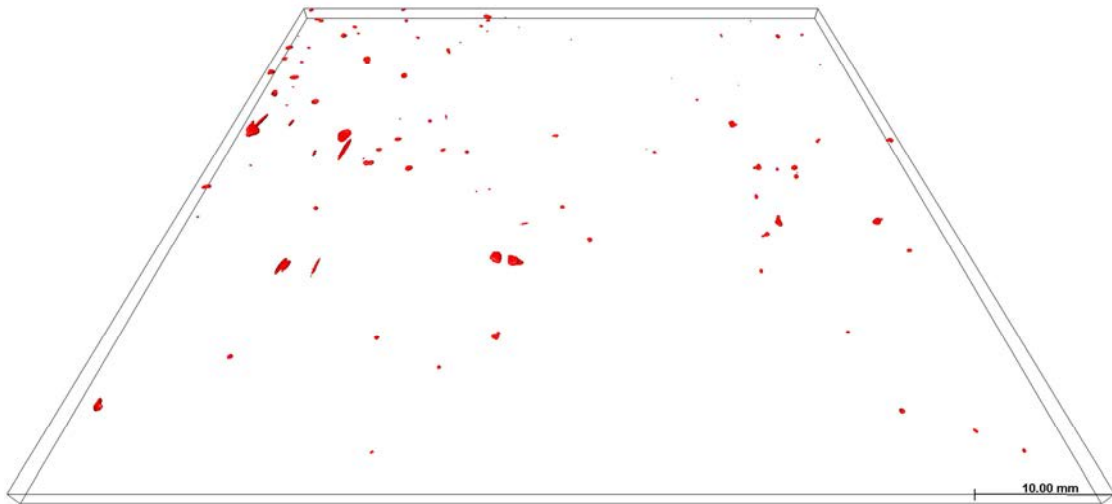


Bild 60: 3D-Darstellung der Probe V6/1. Druckgesteuerte Injektion mit 10 bar. Volumenporosität: 0,07%. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre)

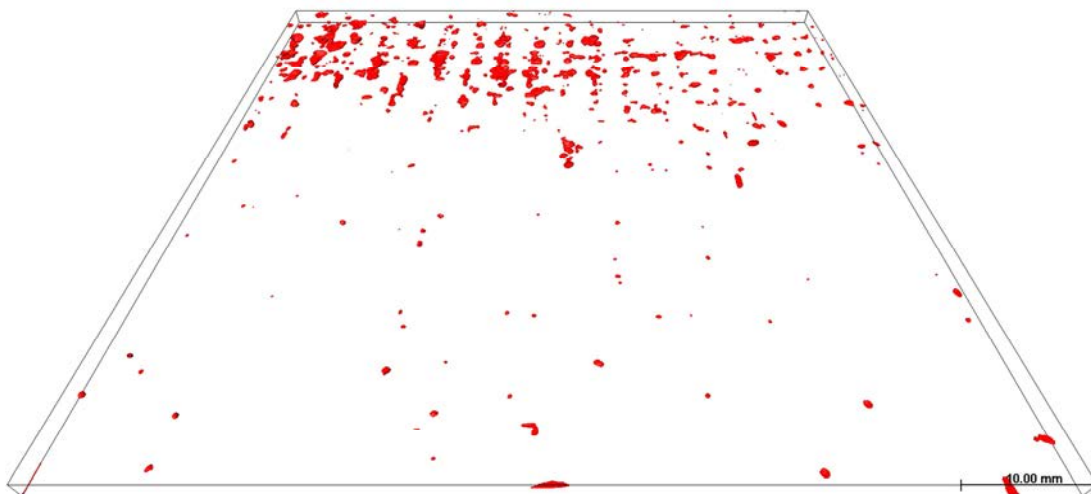


Bild 61: 3D-Darstellung der Probe V6/2. Druckgesteuerte Injektion mit 10 bar. Volumenporosität: 0,59%. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre)

3.2.7.2 Hoher Druck – 15 bar

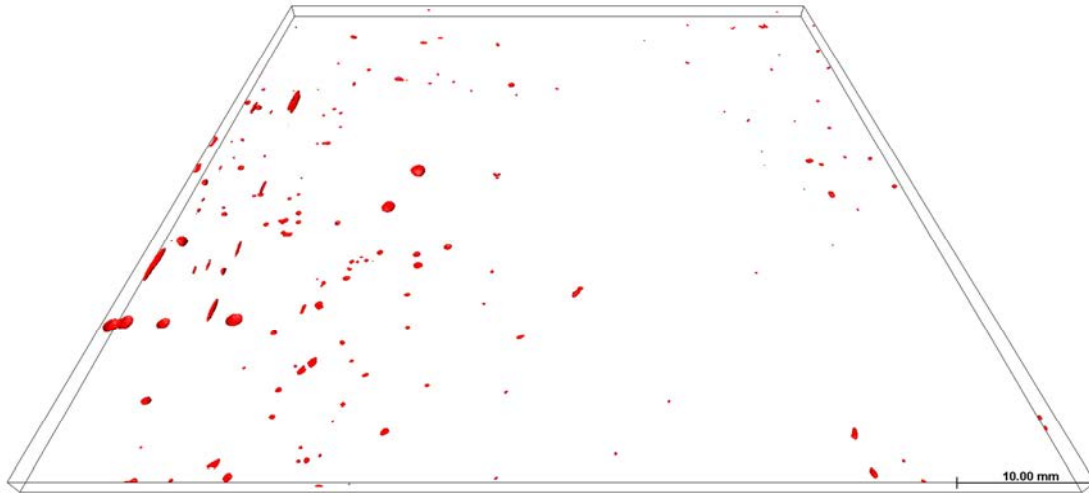


Bild 62: 3D-Darstellung der Probe V7/1. Druckgesteuerte Injektion mit 15 bar. Volumenporosität: 0,09%. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre)

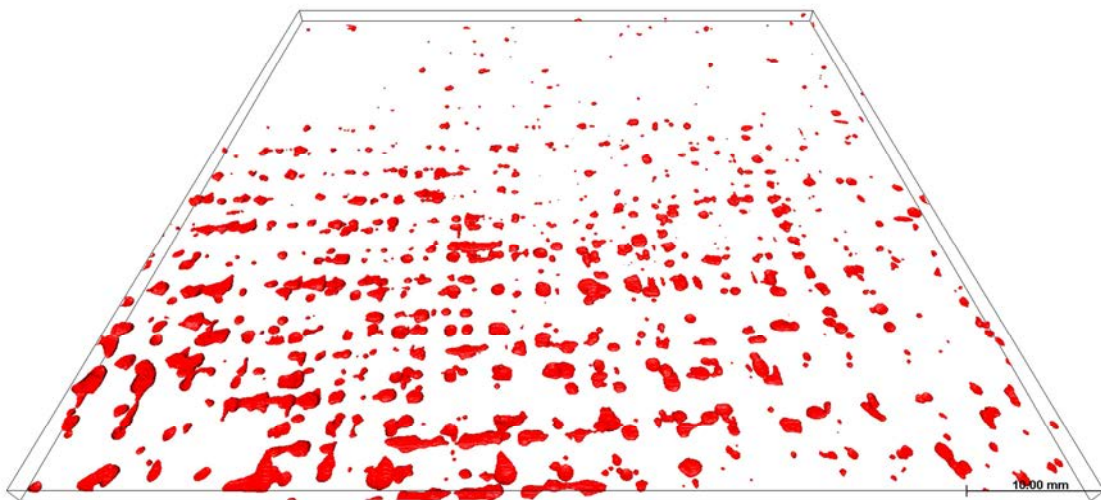


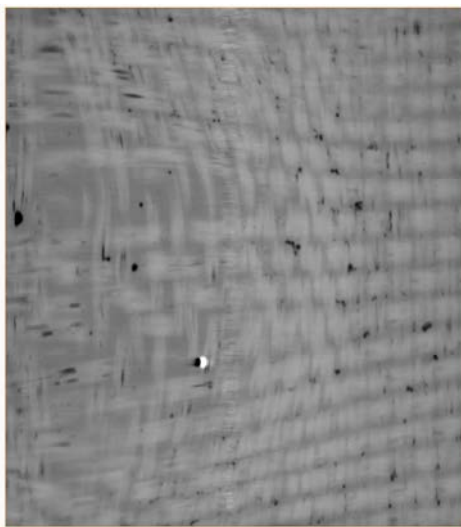
Bild 63: 3D-Darstellung der Probe V7/2. Druckgesteuerte Injektion mit 15 bar. Volumenporosität: 1,21 %. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre)

3.2.8 Einfluss des Injektionsdrucks auf die Porosität und das Gewebe

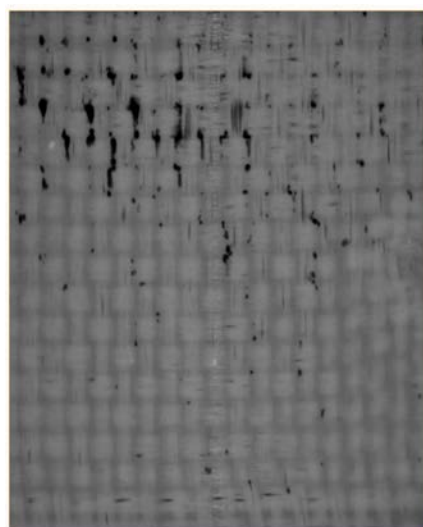
Eine Erhöhung des Regeldrucks erweist sich als negativ. Hierbei hat sich die Volumenporosität am Steigerpunkt mehr als verdoppelt, wie in Tabelle 7 dargestellt. Zwar ist dies an Position 1 nicht der Fall aber die Verschiebung des Gewebes ist stärker.

Tabelle 7: Gegenüberstellung Porositätsgehalt V6/ V7

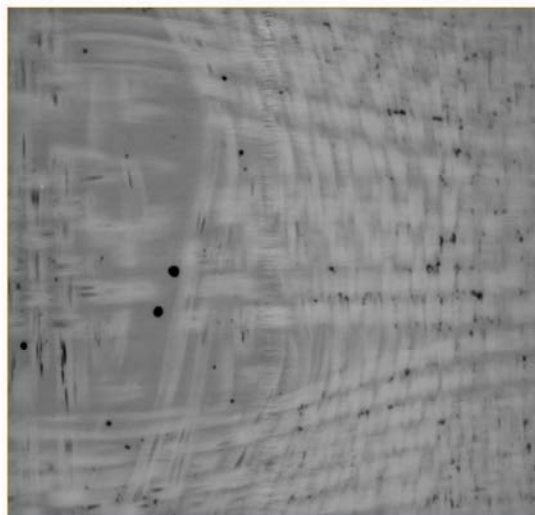
Probe	10 bar (V6)	15 bar (V7)
Volumenporosität [%] Position 1	0,07	0,09
Volumenporosität [%] Position 2	0,59	1,21



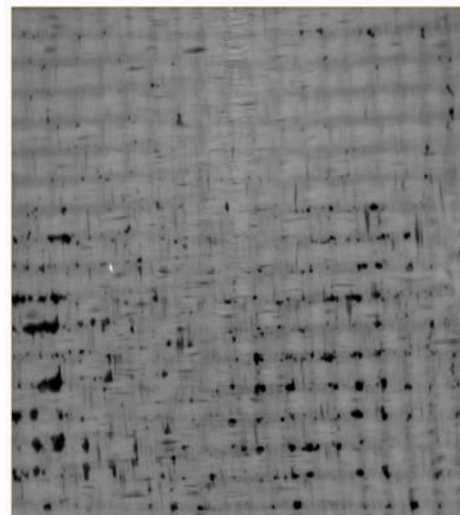
(a)



(b)



(c)



(d)

Bild 64: Gegenüberstellung der CT-Slices aus der Mitte der Z-Achse

Druckgesteuert [10 bar]: (a) V6/1, (b) V6/2

Druckgesteuert [15 bar]: (c) V7/1, (d) V7/2

3.2.9 Einsatz eines Vakuums (mikro-CT)

Tabelle 8: Prozessparameter mit Vakuum

Prozessparameter	V2 Ohne Vakuum	V4 Mit Vakuum
Werkzeugtemperatur	75 °C	75 °C
Harztemperatur	65 °C	65 °C
Injektionsdruck	15 bar	15 bar
Injektionsgeschwindigkeit	3,4 kg/min	3,4 kg/min
Schussgewicht	1,5 kg	1,5 kg
Vakuum	---	0,8 bar

3.2.9.1 Injektion mit Anlegen eines Vakuums

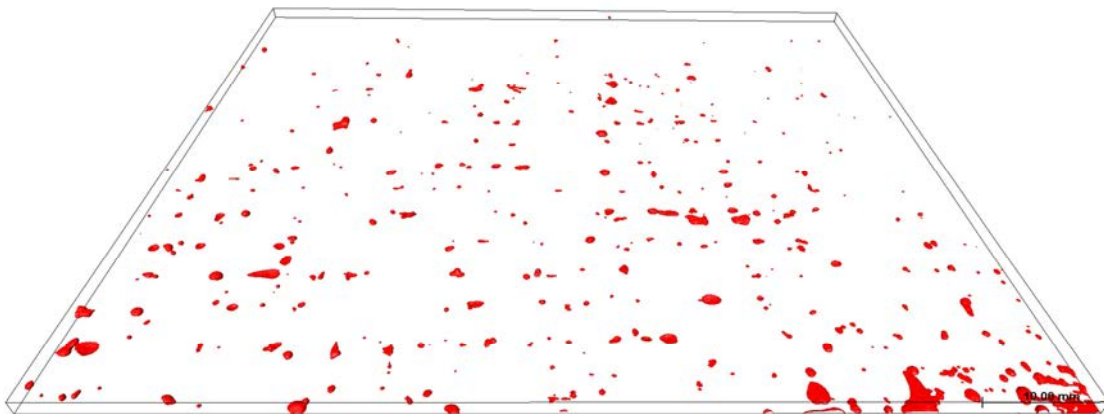


Bild 65: 3D-Darstellung der Probe V4/1. Injektionsgeschwindigkeit von 3,4 kg/min mit Vakuum. Volumenporosität: 0,24 %. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre)

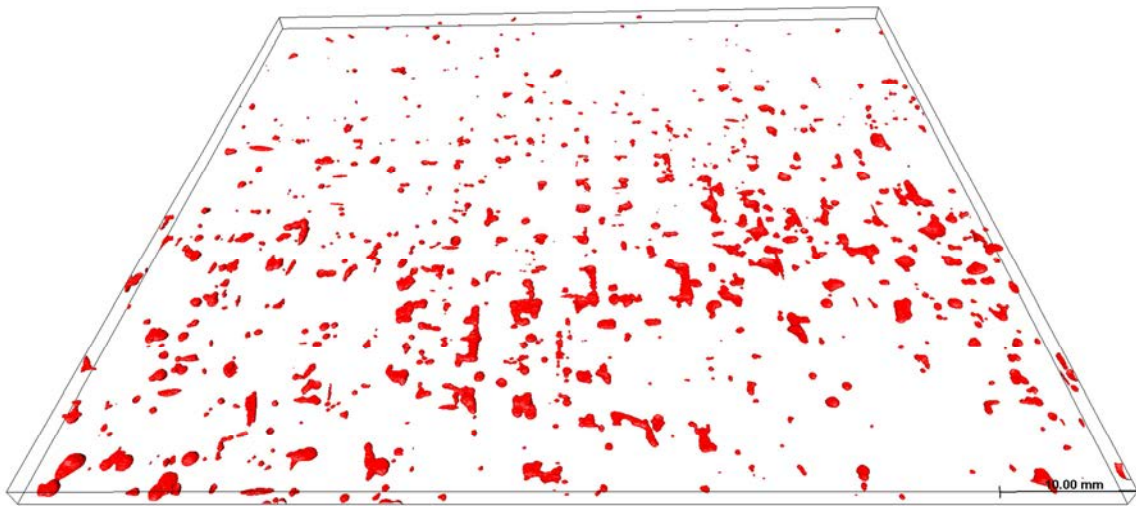


Bild 66: 3D-Darstellung der Probe V4/2. Injektionsgeschwindigkeit von 3,4 kg/min mit Vakuum. Volumenporosität: 0,73 %. 60 μm Voxelgröße (Mikrofokusröhre)

3.2.9.2 Injektion ohne Vakuum

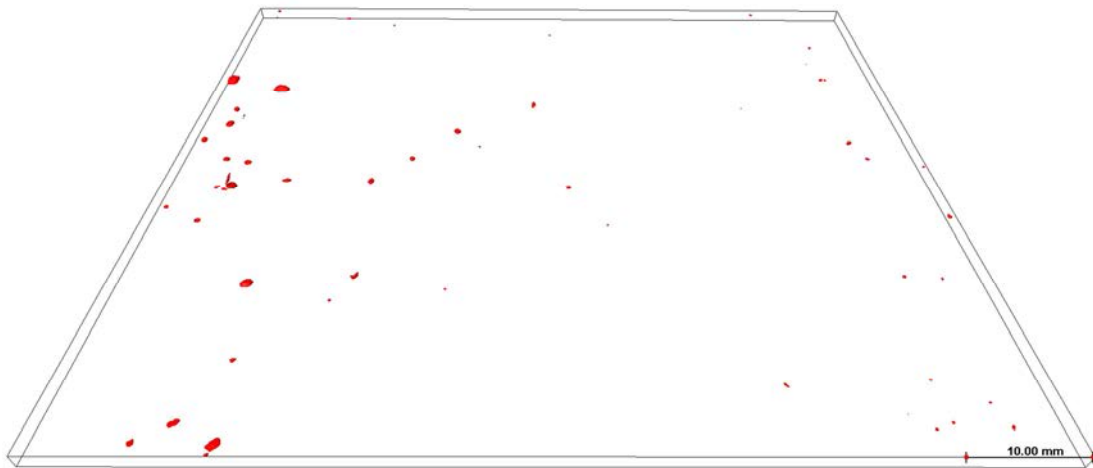


Bild 67: 3D-Darstellung der Probe V2/1. Injektionsgeschwindigkeit von 3,4 kg/min ohne Vakuum. Volumenporosität: 0,03%. 60 μm Voxelgröße (Mikrofokusröhre).

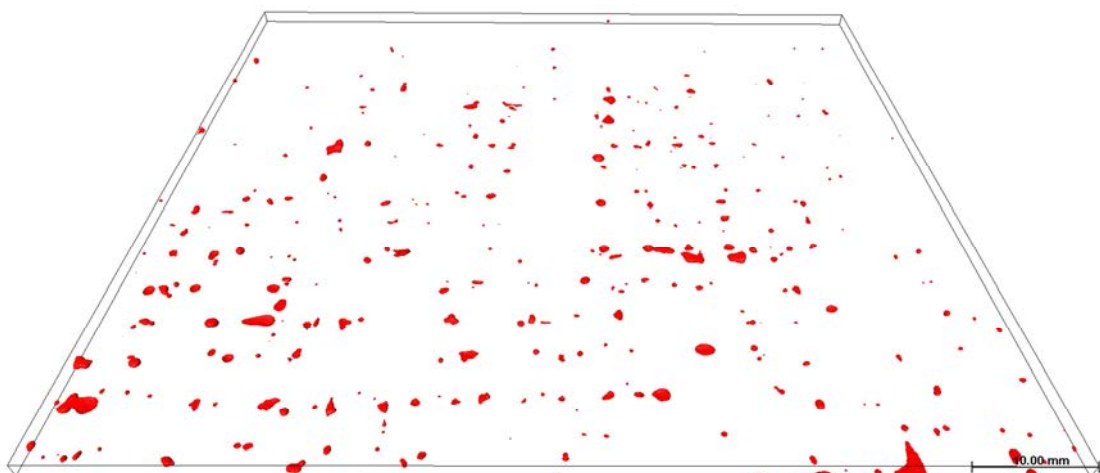


Bild 68: 3D-Darstellung der Probe V2/2. Injektionsgeschwindigkeit von 3,4 kg/min ohne Vakuum. Volumenporosität: 0,21%. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre).

3.2.10 Einfluss des Vakuums auf die Porosität und das Gewebe

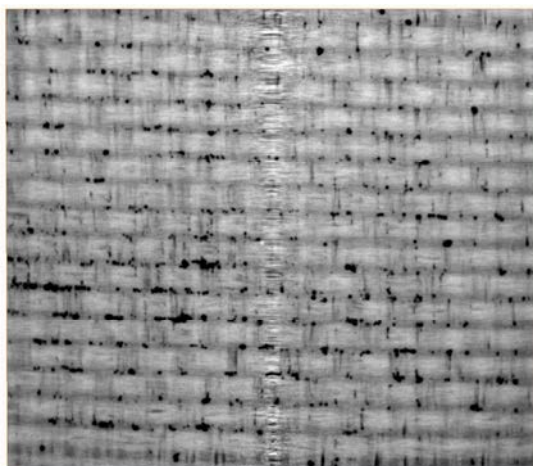
Entgegen der Erwartung weist das Bauteil, das durch Anlegen eines Vakuums gefertigt wurde (V4) eine höhere Porosität auf, wie in Tabelle 9 aufgezeigt. Grund dafür könnte der erniedrigte Forminnendruck sein (siehe Anhang III und IV). Bei einer Injektion ohne Vakuum pendelt sich nach 0,75 kg Schussgewicht ein Innendruck von 18 bar ein. Bei Anlegen eines Vakuums wird nach 0,75 kg Schussgewicht nur ein Druck von 10 bar erreicht.

Tabelle 9: Gegenüberstellung Porositätsgehalt V4/ V2

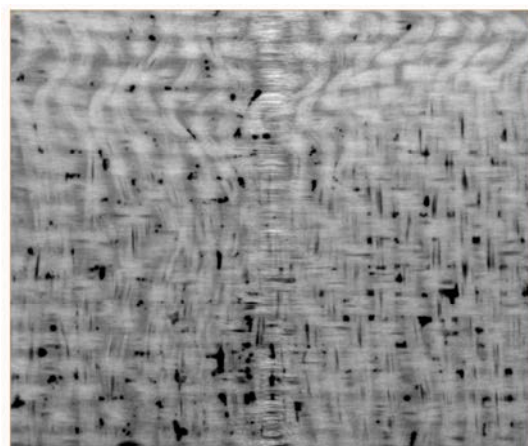
Probe	Mit Vakuum (V4)	Ohne Vakuum (V2)
Volumenporosität [%] Position 1	0,24	0,03
Volumenporosität [%] Position 2	0,73	0,21

Auch beim Bauteil V4 kommt es an Position 2 im oberen Bereich zu Verschiebung des Gewebes, siehe Bild 69(b) und inhomogenen Porositätsverteilung im Volumen, was in Bild 66 eindeutig zu erkennen ist. Diese Merkmale sind bei Bauteil 4 jedoch stärker ausgeprägt als beim Bauteil 2.

Betrachtet man die Positionen 1 fällt auf, dass die Poren bzw. Lufteinschlüsse zwischen Kett- und Schussfaden lokalisiert sind, wobei an Position 2 auch Poren in den Rovings (längliche Poren) vorhanden sind.



(a)



(b)

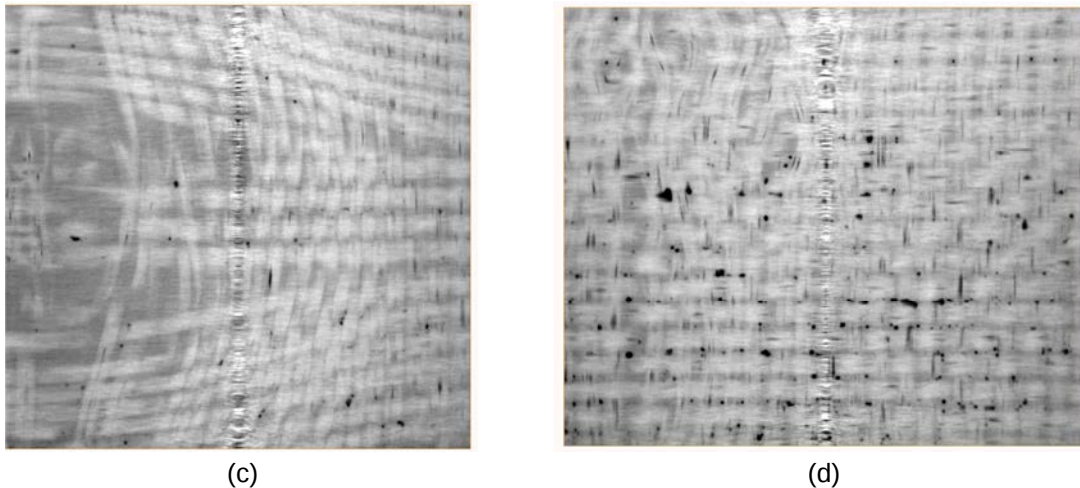


Bild 69: Gegenüberstellung der CT-Slices aus der Mitte der Z-Achse

Mit Vakuum: (a) V4/1, (b) V4/2

Ohne Vakuum: (c) V2/1, (d) V2/2

3.2.11 AP 12: Injektion mit Spülphase (mikro-CT)

Tabelle 10: Prozessparameter bei unterschiedlicher Werkzeugtemperatur

Prozessparameter	V5 Mit Spülphase	V1 Ohne Spülphase
Werkzeugtemperatur	75 °C	75 °C
Harztemperatur	65 °C	65 °C
Injektionsdruck	15 bar	15 bar
Injektionsgeschwindigkeit	1,5 kg/min	1,5 kg/min
Schussgewicht	2 kg	1,5 kg
Vakuum	---	---

Es wurde mit 0,5 kg Harz-Härter Gemisch nachgespült mit dem Ziel die Luft zu verdrängen.

3.2.11.1 Injektion mit Spülphase

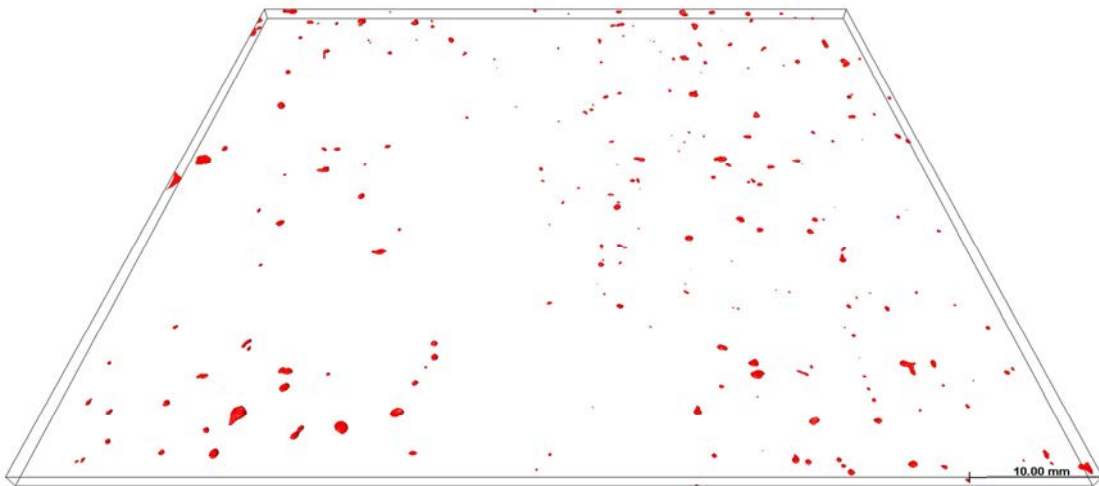


Bild 70: 3D-Darstellung der Probe V5/1 mit Spülphase. Volumenporosität von 0,10%. 60 μm Voxelgröße (Mikrofokusröhre)

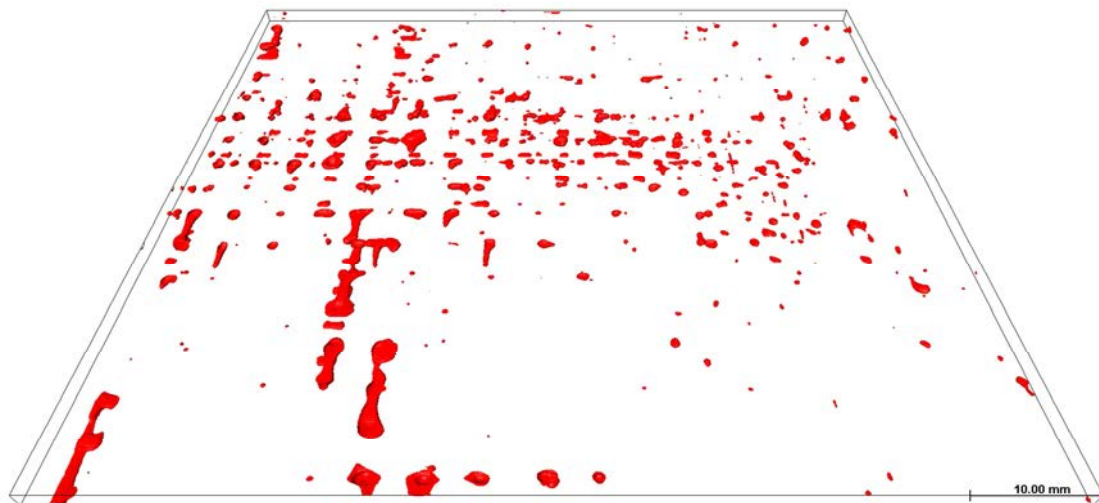


Bild 71: 3D-Darstellung der Probe V5/2 mit Spülphase. Volumenporosität von 1,03%. 60 μm Voxelgröße (Mikrofokusröhre)

3.2.11.2 Injektion ohne Spülphase

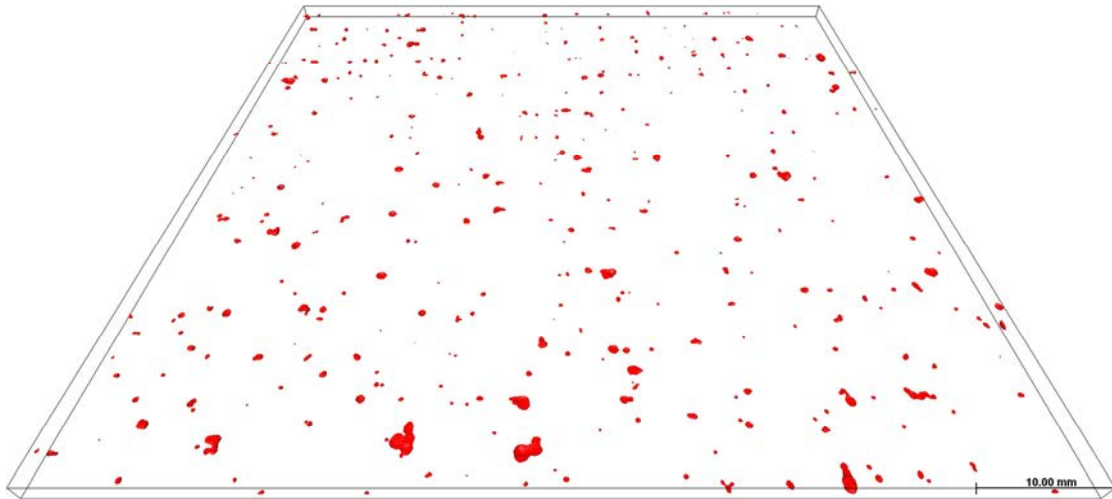


Bild 72: 3D-Darstellung der Probe V1/1. Injektionsgeschwindigkeit von 1,5 kg/min. Volumenporosität: 0,13 %. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre)

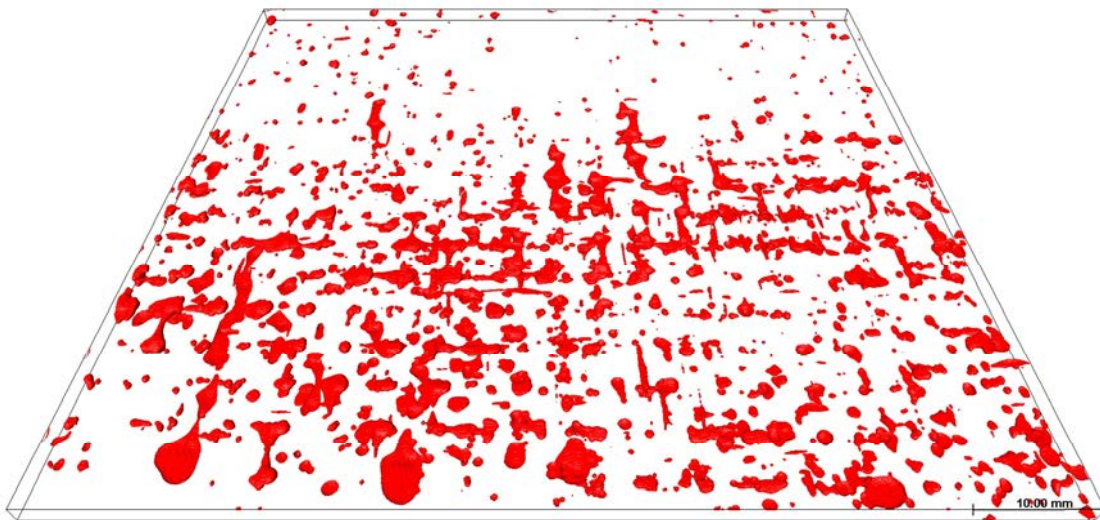


Bild 73: 3D-Darstellung der Probe V1/2. Injektionsgeschwindigkeit von 1,5 kg/min. Volumenporosität: 2,69 %. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre)

3.2.12 Einfluss einer Spülphase auf die Porosität und das Gewebe

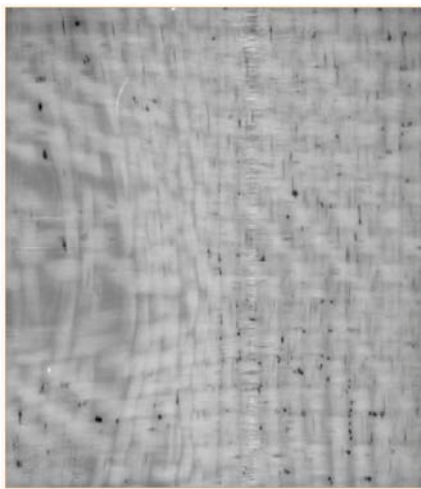
Als Referenz für das Bauteil, das mit anschließender Spülphase gefertigt wurde (V5), wurde Versuchsbauteil 1 gewählt, da es im Rahmen der unterschiedlichen Injektionsgeschwindigkeiten die höchste Porosität aufzeigte. Daher kann eine mögliche Verbesserung der Volumenporosität direkt der Spülphase zugeordnet werden.

Wie der Literatur zu entnehmen ist, können trockene Flächen nachgetränkt werden und die in der Kavität verbliebene Luft herausgespült werden. Besonders an Position 2 kann dieser Effekt beobachtet werden. Durch zusätzliche Spülphase wurde die Volumenporosität mehr als halbiert, siehe Tabelle 11. Auch an Position

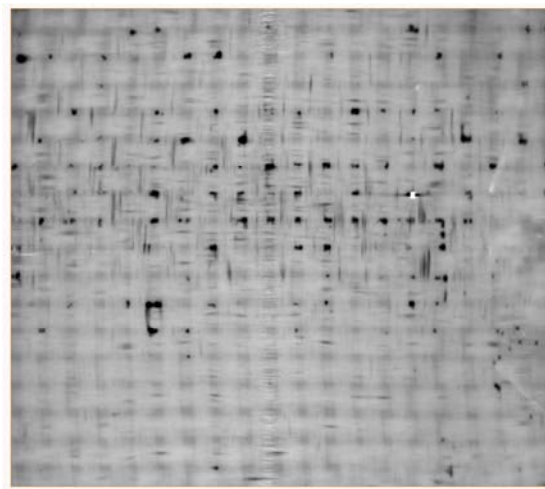
1 ergab sich eine Reduzierung, jedoch wie in Bild 74(a) zu erkennen ist, hat sich hierbei das Gewebe verschoben.

Tabelle 11: Gegenüberstellung Porositätsgehalt V5/ V1

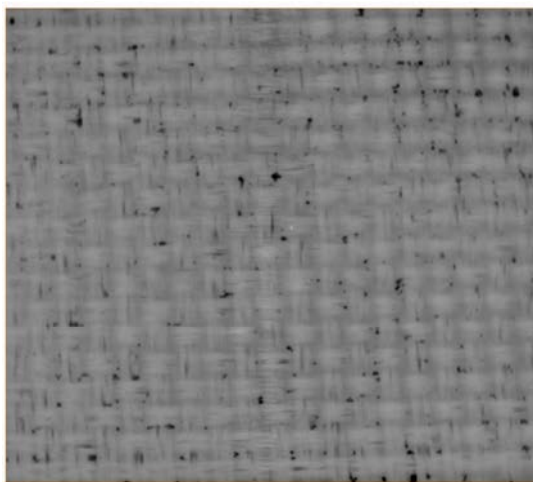
Probe	Mit Spülphase (V5)	Ohne Spülphase (V1)
Volumenporosität [%] Position 1	0,10	0,13
Volumenporosität [%] Position 2	1,03	2,69



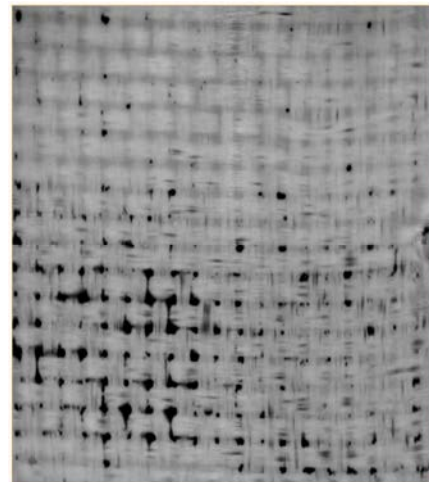
(a)



(b)



(c)



(d)

Bild 74: Gegenüberstellung der CT-Slices aus der Mitte der Z-Achse. Mit Spülphase: (a) V5/1, (b) V5/2, Ohne Spülphase: (c) V1/1, (d) V1/2

3.2.13 AP 13: Korrelation der ermittelten Eigenschaften mit den Prozessparameter

Wie Tabelle 12 zu entnehmen ist wurde der geringste Porengehalt bei einer Injektionsgeschwindigkeit von 3,4 kg/min erreicht.

Tabelle 12: Zusammenfassung aller Porositätsgehalte

Probe/ Versuch	1,5 kg/min (V1)	3,4 kg/min (V2)
Volumenporosität [%] Position 1	0,13	0,03
Volumenporosität [%] Position 2	2,69	0,21
Probe/ Versuch	5,5 kg/min (V3)	Mit Vakuum (V4)
Volumenporosität [%] Position 1	0,08	0,24
Volumenporosität [%] Position 2	0,21	0,73
Probe/ Versuch	Mit Spülphase (V5)	10 bar (V6)
Volumenporosität [%] Position 1	0,10	0,07
Volumenporosität [%] Position 2	1,03	0,59
Probe/ Versuch	15 bar (V7)	80 °C (V8)
Volumenporosität [%] Position 1	0,09	0,54
Volumenporosität [%] Position 2	1,21	2,54

Bei allen Versuchen konnte eine mehr oder weniger starke Verschiebung des Fasergewebes, meist bedingt durch eine vor eilende Harzfront festgestellt werden. Ein minimieren der Volumenporosität konnte durch eine zusätzliche Spülphase beobachtet werden.

3.3 Vorgehen und Ergebnisse des Arbeitsblocks 3: Ultraschall und Ultraschall-Signalanalyse

3.3.1 Ultraschall Grundlagen

Die ZfP mittels Ultraschall (US) basiert auf dem Prinzip der Wechselwirkung des Ultraschalls mit dem zu prüfenden Material selbst (Prüfling) bzw. darin vorhandenen Inhomogenitäten (beispielsweise das Echo eines Lunkers in einem Gussteil). Die Stärke dieser Wechselwirkung hängt (unter Berücksichtigung idealer Einschallbedingungen) maßgeblich von unterschiedlichen Schallkennimpedanzen Z ab. Neben geringer Dichte zeichnet sich Luft auch durch niedrige Schallgeschwindigkeit für US aus, weshalb sich die Schallkennimpedanz (SKI) von Luft deutlich von jener anderen Materialien unterscheidet und somit eine starke Wechselwirkung hervorruft.

Der Schall wird mechanisch in den Prüfling eingekoppelt durch Anlegen von Wechsellspannung an einen piezoelektrischen Kristall, welcher sich in Abhängigkeit von dieser Anregungsfrequenz zusammenzieht bzw. ausdehnt. Beim Empfang wird der umgekehrte piezoelektrische Effekt ausgenutzt, d.h. eine mechanische Welle, die mit der Frequenz f an den Prüfkopf gelangt, erzeugt eine gewisse Wechsellspannung, welche das Echo darstellt. Auch hier spielt die SKI eine nicht zu verachtende Rolle, denn der Schall bedarf einer Übertragung in den bzw. aus dem Prüfling. Dies ist der Grund, weshalb in den allermeisten Fällen ein Koppelmedium wie bspw. Öl, Wasser, Paste und der Gleichen zum Einsatz kommt, damit der (mikroskopisch quasi allgegenwärtige und unerwünschte) Luftspalt zwischen Prüfling und Prüfkopf durch ein adäquates Koppelmedium ersetzt wird.

Wichtige US-Formeln:

Schallgeschwindigkeit $c = \lambda * f$	$\lambda = \text{Wellenlänge [nm]}$ $f = \text{Frequenz [Hz]}$
Longitudinalgeschwindigkeit $c_l =$ $\sqrt{\frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} \frac{E}{\rho}}$	$\mu = \text{Poissonzahl}$ $E = \text{Elastizitätsmodul} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$ $\rho = \text{Dichte} \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$
Transversalgeschwindigkeit $c_t = \sqrt{\frac{1}{2(1+\mu)} \frac{E}{\rho}} =$ $\sqrt{\frac{G}{\rho}}$	$G = \text{Torsionsmodul} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$

Schalldruckdifferenz $\Delta p = 20 \log \frac{p_1}{p_2}$	$p_i = \text{Schalldrücke [V]}$ $\Delta p = [\text{dB}]$
Intensitätsdifferenz $\Delta I = 10 \log \frac{I_1}{I_2}$	$I_i = \text{Intensitäten}$
Schwächungsgesetz: $p = p_0 e^{-\alpha d}$	α $= \text{Schwächungskoeffizient } \left[\frac{\text{dB}}{\text{m}} \right]$ $d = \text{zurückgelegte Strecke [m]}$
Nahfeldlänge: $N = \frac{D^2}{4 \lambda}$	D $= \text{Schwingerdurchmesser [mm]}$
Bündeldivergenz: $\arcsin_{\gamma_6} = \frac{0,51 \lambda}{D}$	Bündeldiverg. $= \frac{\text{Öffnungs-} \varnothing}{2} [^\circ]$
Schallkennimpedanz: $Z = \rho * c$	$Z = [\text{rayl}] = \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} * \text{s}^2} \right]$

3.3.2 Ultraschallverfahren

Grundsätzlich lassen sich zwei konzeptionell verschiedene Techniken unterscheiden: Zum einen die Durchschallungs- (DS) und zum anderen die Impuls-Echo (IE)-Prüfung (siehe Abbildung 1). Der maßgebliche Unterschied ist darin begründet, dass die IE-Technik einen Bezug zur Zeit aufweist, während bei der DS-Technik nur die Amplituden-Information vorhanden ist.

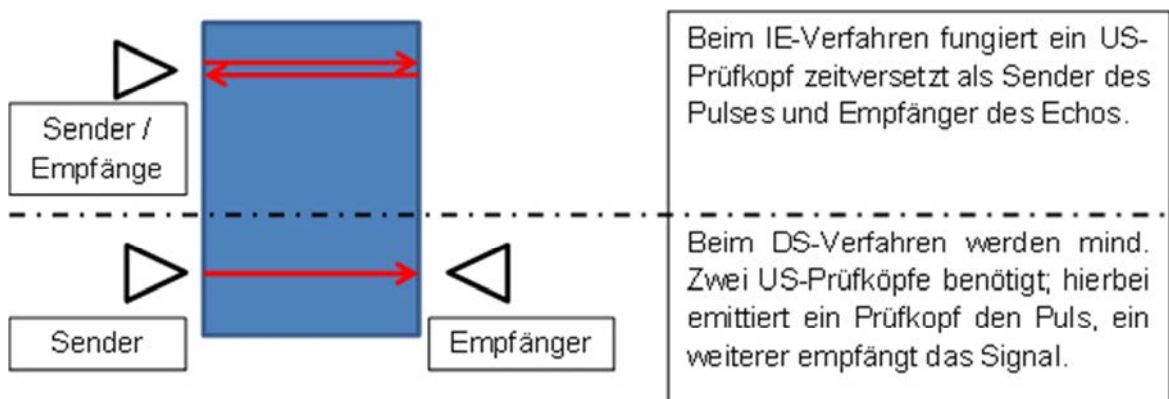


Bild 75: Skizze US-Prüfung in IE- und DS- Technik

Im Sprachgebrauch der ZfP mittels Ultraschall sind u.a. folgende Begrifflichkeiten gängig und werden deshalb hier kurz am Beispiel eines IE-Pulses erläutert. A-Bild: Amplituden-darstellung des Zeitsignals in % BSH über Weg bzw. Zeit; C-Bild: (Farb-) codierte Projektion der Amplituden auf die Fläche des Prüflings; B-Bild: Tiefenschnitt durch das C-Bild.

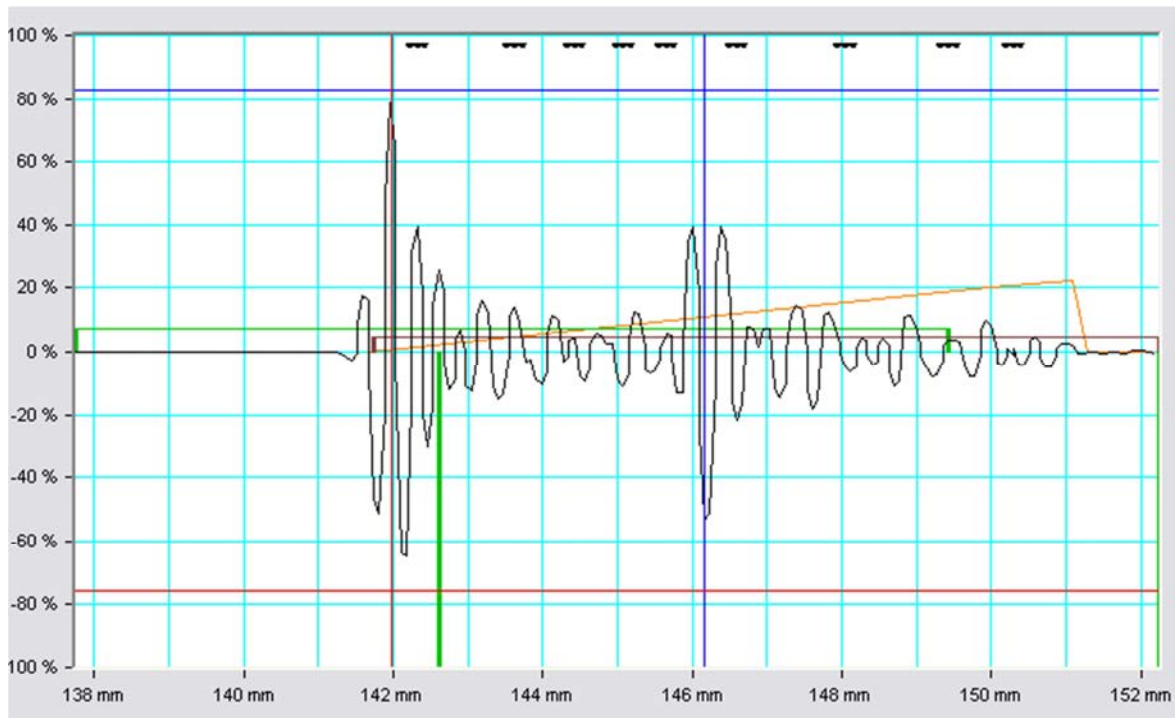


Bild 76: A Bild IE-Technik, Darstellung der Amplitude über der Zeit

In voriger Bild 76 ist ein schwarzer Graph zu erkennen, dies ist die Amplitude des Schalls aufgetragen über der Zeit bzw. (bei Kenntnis der Schallgeschwindigkeit) über dem Weg. Hier zusätzlich dargestellt mit rotem Cursor ist der Eintritt in das Material, sowie die Reflexion des Schalls an der RW des Materials (dargestellt durch blauen Cursor). Die schräg verlaufende, orange Linie visualisiert den Tiefenausgleich, die grünen Fensterungen bilden Blenden im Messsystem ab (Schwellwert, Beginn der Aufzeichnung, etc.).

Um Informationen über ganze Regionen zu erhalten, ist es notwendig den Prüfling in geeigneter Art und Weise einer vollständigen Prüfung zu unterziehen, d.h. an zahlreichen Punkten solche A-Bilder aufzunehmen. Dies ist Voraussetzung für das C-Bild: Jeder einzelne Farbpunkt repräsentiert im C-Bild beispielsweise die maximale Amplitude aus einem A-Bild. Alle Maxima werden auf die Einschallebene projiziert, wobei der jeweilige skalare Wert dieser Amplitude dann farbcodiert dargestellt wird (blau= hohe, rot= niedrige Amplitude). Der Unterschied zum B-Bild besteht allein in der Projektionsrichtung, wie nachfolgende Bild 77 erläutert:

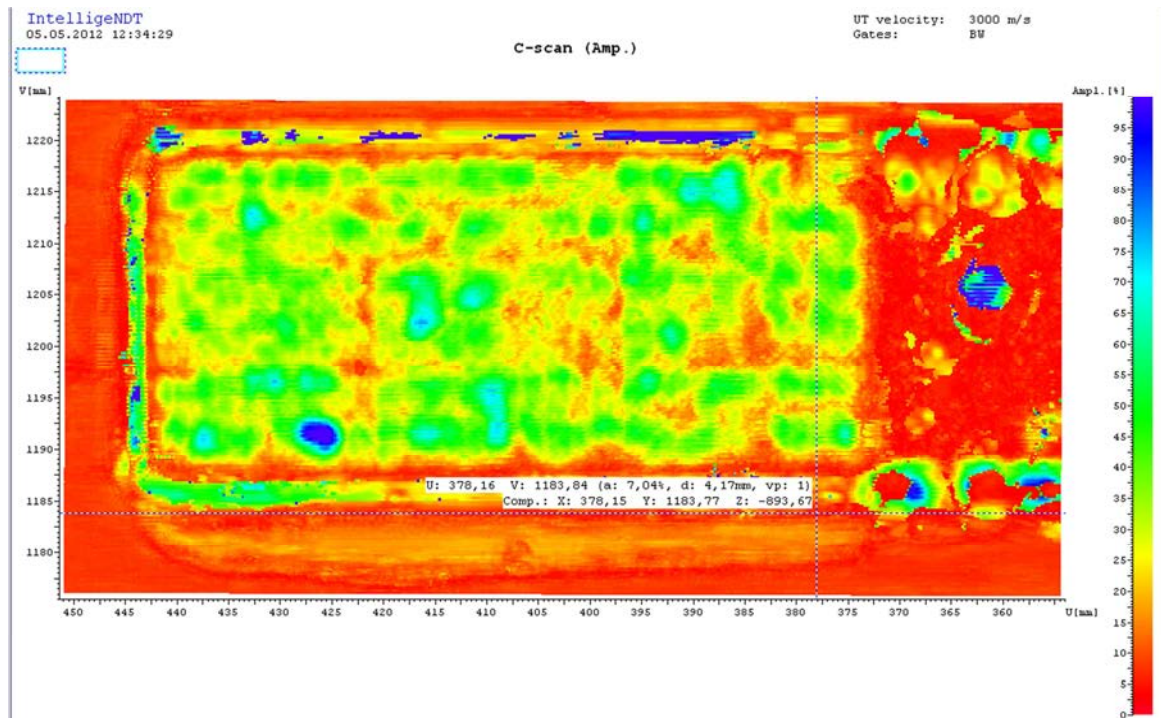


Bild 77: C-Bild

Anstatt die Amplitude auf die Einschallebene zu projizieren, wird beim B-Bild nun ein Schnitt orthogonal zur Einschallebene dargestellt, wie in Bild 77 zu sehen ist. Dargestellt sind somit alle farbcodierten Amplitudenwerte aus den jeweiligen A-Bildern der entsprechenden Positionen.

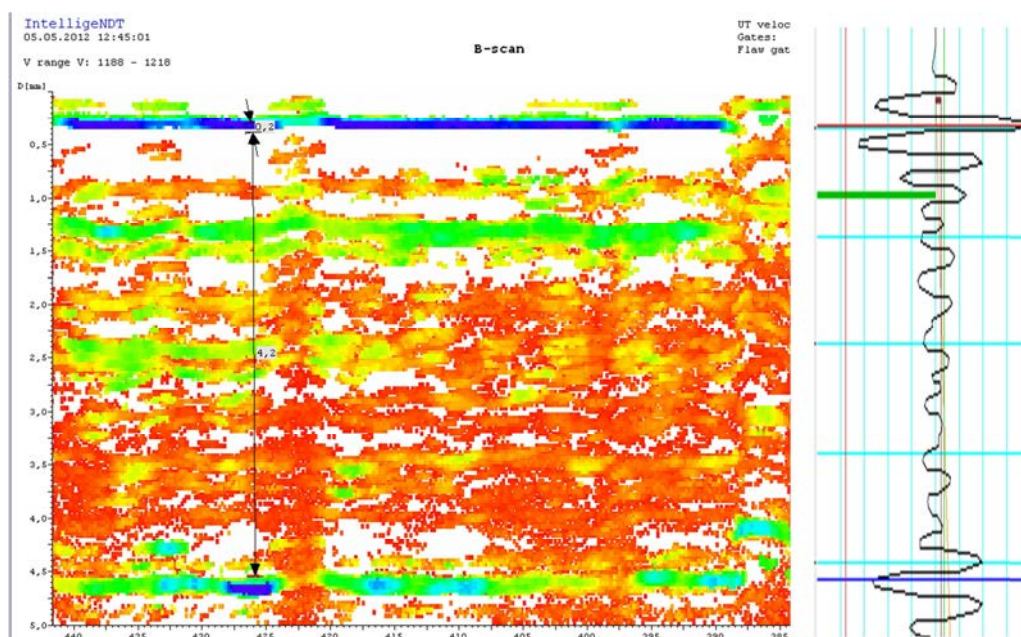


Bild 78: B-Bild: Prinzipieller Aufbau eines B-Bildes (farbcodierte Amplitudendarstellung aufgetragen über die Tiefe)

Eine zur Visualisierung vorteilhaftere Darstellung ist die des dreidimensionalen B-Scans, in welcher die einzelnen A-Bilder ortstreu dargestellt werden und nicht wie im gewöhnlichen B-Bild über die Fläche projiziert dargestellt sind.

3.3.3 Experimenteller Versuchsaufbau

Zur Ermittlung der Ultraschalldaten wurde einseitige IE-Squirter- bzw. Tauchtechnik angewandt, diese Prüftechnik basiert auf dem Impuls-Echo-Verfahren. Hierbei wird der Ultraschall über einen Wasservorlauf in das Material eingeleitet, das Echo wird über denselben Weg empfangen.

3.3.3.1 Prüfköpfe

Bei der Prüfung wurden Prüfköpfe der Mittenfrequenzen 5, 10 und 15 MHz mit folgenden Spezifikationen verwendet:

Tabelle 13: Tabelle mit Spezifikationen der verwendeten Prüfköpfe

Mittenfrequenz und Bezeichnung	Schwinger-Durchmesser	Theoretische Nahfeld-länge in Wasser	Fokuspunkt
5,0 MHz, OLYMPUS PANAMETRICS-NDT V326	3/8 " = 9,525 mm	76,2 mm	-
10,0 MHz, OLYMPUS PANAMETRICS-NDT- V312	1/4 " = 6,35 mm	67,0 mm	-
15,0 MHz, OLYMPUS PANAMETRICS-NDT V313-SM	1/4 " = 6,35 mm	91,2 mm	30,0 mm

3.3.3.2 Hardware

6-achsiger Roboter: Stäubli© RX 170

US-Gerät: SaphirPLUS©

Oszilloskop: Tektronix© DPO 2012, Bandbreite 100MHz, Samplerate 1GS/s

3.3.3.3 Software

- US-Datenakquisition/-auswertung, Steuerung Roboter: ISQUS© - R
- Kommunikation mit Oszilloskop: OpenChoice© 2.0
- Signalanalyse: MATLAB© R2010a Student
- Darstellung, Verarbeitung von CT-Datensätzen: Avizo Fire© 6.3.1

Die für dieses Forschungsprojekt untersuchten CFK-Testkörper wurden in eine mit Vertiefungen versehene Platte aus Plexiglas eingelassen. Hierbei wurden die Testkörper auf eine jeweils ca. 1mm starke Korkplatte gelegt, bevor sie eingeklebt wurden, damit ein deutliches Rückwandecho zu detektieren war und der US-Impuls nicht in das Plexiglas ausgeleitet würde. Mittels eines 6-achsigen Roboters wurde der Prüfkopf in einem definierten Abstand über die Probe geführt, wobei ein zuvor erstelltes Fahrprogramm zum Einsatz kam. Während dieses Fahrprogramms erfolgte mittels des Ultraschallgeräts SaphirPLUS sowohl das Senden als auch Empfangen der Ultraschallsignale. Diese Signale wurden in Form von A-Bildern gespeichert und nach fertiggestellter Messung der Software ISQUS-R zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung gestellt.

Parallel hierzu wurden an ausgezeichneten Probenbereichen A-Bilder aufgenommen, indem das Ausgangssignal direkt am Ultraschallgerät abgegriffen, dem Oszilloskop zugeführt und via der Kommunikationssoftware OpenChoice in Form einer $[2 \times n]$ Matrix gespeichert wurde. Nach Konvertierung der Matrix in ein adäquates Dateiformat bestand die Möglichkeit, die Zeit-Spannungs-Wertepaare aus der $[2 \times n]$ -Matrix in Matlab einzulesen und zur Signalanalyse bereitzustellen.

3.3.4 US-Untersuchungsergebnisse

Als Grundlage für die Untersuchung der CFK-Testkörper dienen Röntgencomputertomographische (XCT) Aufnahmen, welche zum einen eine sehr detaillierte Informationstiefe bieten und zum anderen zerstörungsfrei sind. Hierzu wurde an der HTW Aalen ein Algorithmus entwickelt, der es erlaubt, Poren in CFK zu segmentieren und anschließend quantitative Aussagen über deren Größe, Verteilung etc. machen zu können. Der zerstörungsfreie Charakter der XCT macht es

überhaupt erst möglich, die Ergebnisse beider Prüfmethoden miteinander in Beziehung zu setzen, denn seither wurden die Porositätsmessungen an CFK-Material zerstörend entweder in Form von Nassveraschung [] oder durch Auswertung von materialografisch erstellten Schliffbildern [] durchgeführt, wonach die Testkörper nicht mehr für weitere Untersuchungen zu gebrauchen waren.

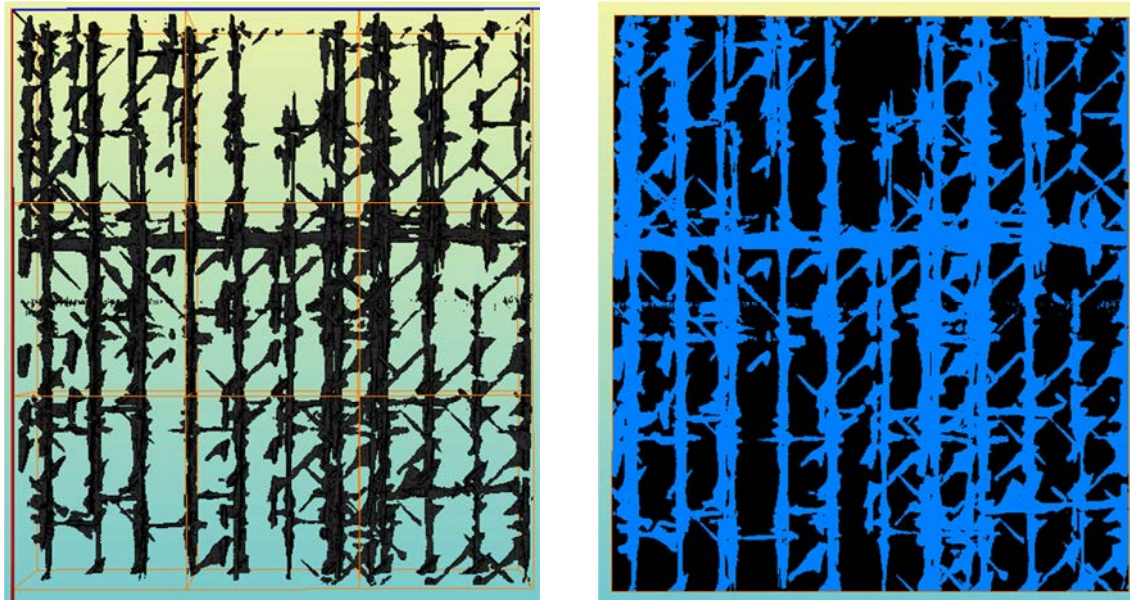


Bild 79: 3D-Darstellung Volumenporosität (2,58%) links und Flächenporosität (45,26%) rechts

In obenstehender Bild 79 ist links ein XCT-Datensatz nach erfolgtem Segmentierungsprozess 3D- visualisiert. Deutlich zu erkennen sind die schwarz dargestellten, schlauchartigen Poren, welche sich entlang der Faser-Rovings ausgebildet haben. Die Abmessungen des untersuchten Bereichs belaufen sich auf etwa 30 x 30 x 4 (l x b x h in [mm]). Um eine etwas genauere Angabe über die lokale Porosität zu erhalten, wurde dieses 30 x 30 Segment in neun Untersegmente aufgeteilt (zu erkennen an den orangenen Begrenzungen der jeweiligen Volumina). Rechts dargestellt ist die Projektion aller Poren in eine Ebene, um den Unterschied zwischen Volumen (2,58%)- und Flächenporosität (45,26%) deutlicher zu machen.

3.3.4.1 Messungen mit 5 MHz

In nachfolgender Abbildung ist ein C-Scan der Probe über einen Tiefenbereich von 0,35 mm bis Probendicke dargestellt. Die starken Intensitätsschwankungen außerhalb der schwarzen Markierung rühren von Dichte- und Dickenunterschieden des Silikons her, mit dem die Probe im Plexi-Probenhalter fixiert wurde.

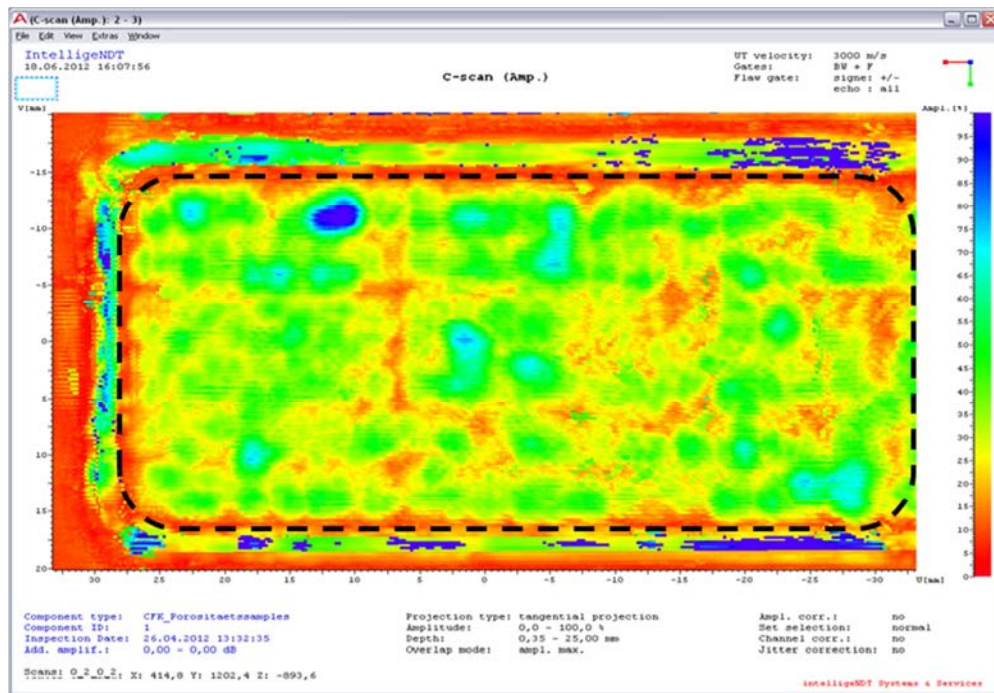


Bild 80: C-Scan der Probe 4a

In Anlehnung an Bild 80 konzentriert sich die nebenstehende Darstellung auf den Bereich der Probe, der mittels CT vermessen und quantifiziert worden ist. Deutlich zu erkennen ist die hohe Amplitude (dunkle Färbung) des rot umrandeten Bereichs. An dieser Stelle ist das deutlichste RW-Echo der gesamten Probe zu detektieren, d.h. der Schall konnte sich dort weniger geschwächt durch das Material ausbreiten und wurde hauptsächlich durch die strukturellen Eigenschaften (Lagenaufbau), nicht aber durch Poren beeinflusst.

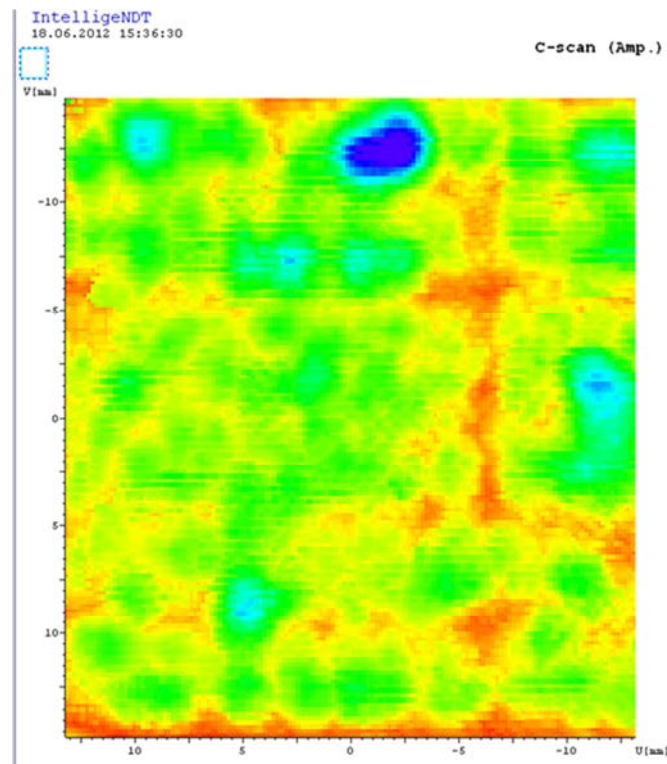


Bild 81: C-Bild des Probenbereichs, welcher mittels CT quantifiziert wurde

Die Einkopplung des Ultraschallsignals in den Prüfling erfolgte bei den Messungen mit fünf MHz durch einen geführten Wasserstrahl (IE-Squirter-Technik). Die kreisrunde Kontaktfläche zwischen Prüfling und Wasserstrahl mit 6mm Durchmesser machte es erforderlich, die in Abb. links dargestellten Segmente auf die Größe des Wasserstrahls einzuschränken, um präzisere Aussagen bezüglich Porosität und Ultraschallsignal treffen zu können. Die nun flächenmäßig auf 6 x 6 mm reduzierten Volumina sind in Bild 82 rechts dargestellt.

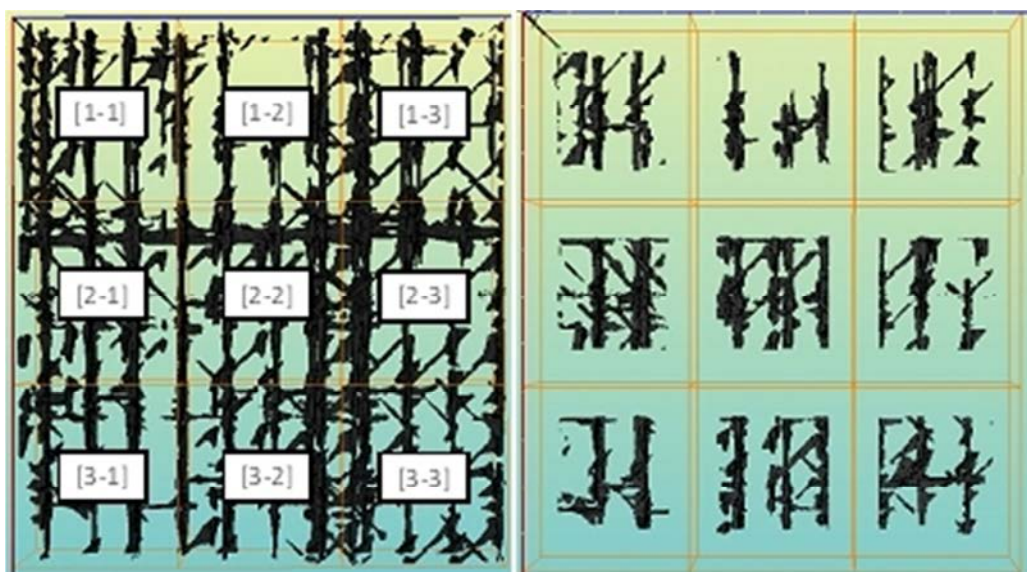


Bild 82: Gesamtes (l.) und reduzierte Volumina der Probe 4a

In Bild 83 ist das A-Bild zum Sektor [1-2] dargestellt. Das rote Fadenkreuz bezeichnet den Eintritt (ET) in den CFK-Prüfling, das blaue die Reflexion an der Rückwand (RW). In der darauffolgenden Bild 84 ist das isolierte RW-Echo samt zugehörigem Frequenzspektrum abgebildet.

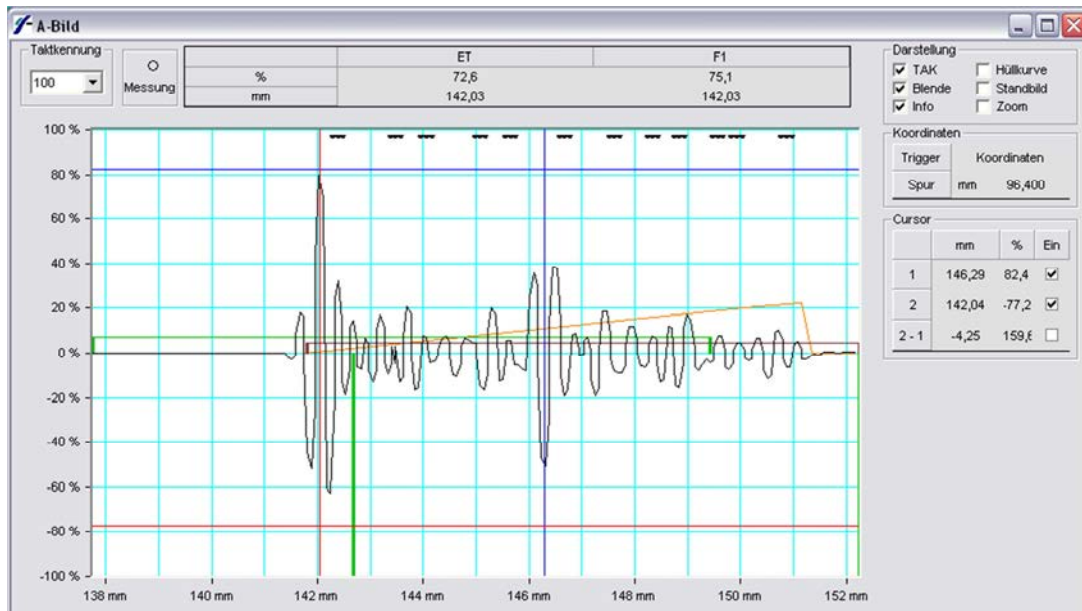


Bild 83: A-Bild zum Sektor [1-2] der Probe 4a

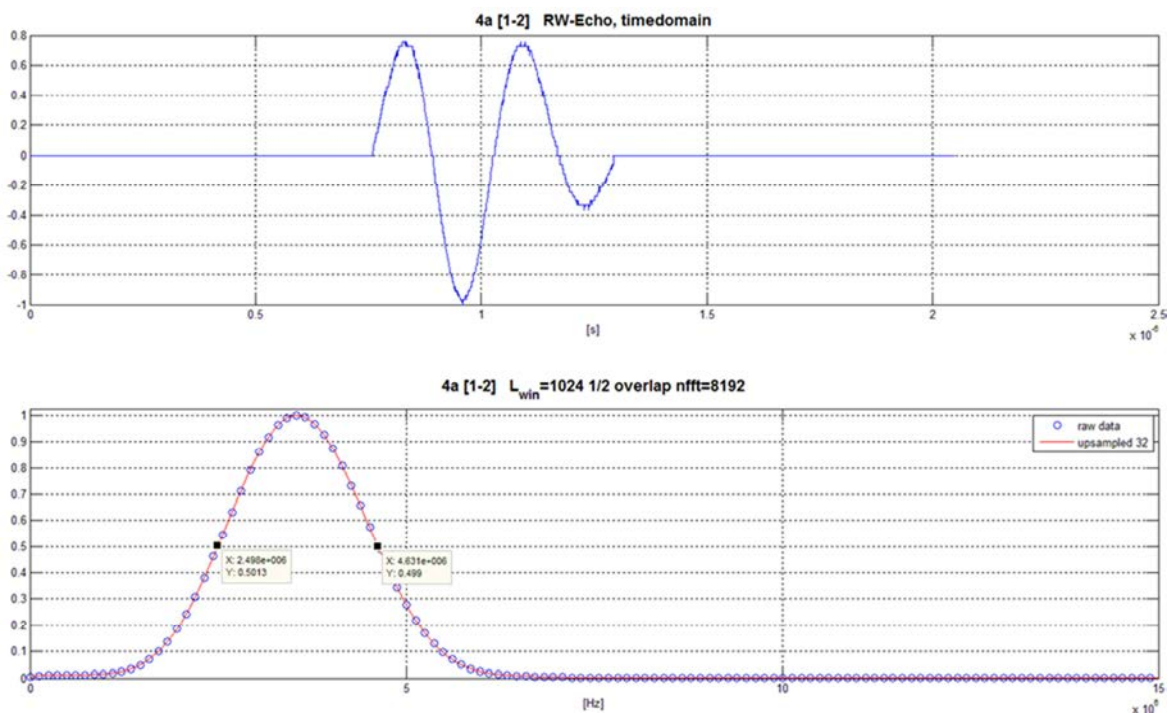


Bild 84: RW-Echo und zugehöriges Amplituden(betrags-) spektrum des Sektors [1-2] der Probe 4a

Die Auflösung der fft wird grundsätzlich durch die Fensterlänge L der fft bestimmt. Als Fensterlänge L wird zumeist die Signallänge verwendet, oder das Signal wird mit Nullen bis zur gewünschten Fensterlänge aufgefüllt („zeropadding“)¹. Bei einer Spektral-Analyse hat man es also immer mit zwei konkurrierenden Prozessen zu tun: Will man möglichst lokal die Frequenz bestimmen, so bietet sich ein kurzer Zeitbereich an, in dem das Spektrum bestimmt werden soll. Ein kurzer Zeitbereich führt aber der Reziprozität auch zu einem breiten, unscharfen Spektrum. Wird dagegen eine hohe Frequenzauflösung gefordert, so muss der Zeitbereich entsprechend größer gewählt werden. Diese Vergrößerung des Zeitbereichs erlaubt zwar präzisere Aussagen hinsichtlich der Frequenz, allerdings ist der Zeitraum, über den gemittelt wurde größer und die zeitliche Auflösung somit verringert.

Die Anzahl der Stützstellen (n_{fft}) kann als ein Diskretisierungsfaktor aufgefasst werden, der die Abstände Δf im Spektrum bestimmt, nicht jedoch die Auflösung. Selbiges Verfahren fand Anwendung bei der Analyse des Eintrittsechos. Die im Anhang zu findende Tabelle stellt vergleichend die gemessenen Mittenfrequenzen sowie die 3dB-Bandbreiten des Frequenzspektrums der Segmente [1-1] bis [3-3] gegenüber und beinhaltet sowohl die Kennwerte Volumenporosität als auch Flächenporosität, welche sich auf die reduzierten 6 x 6 mm Segmente beziehen.

Vergleicht man nun segmentweise die Frequenzspektren von Eintritt zu Rückwand, so stellt man bei zunehmender Porosität zunächst eine Verschiebung des RW-Echos hin zu höheren Frequenzen fest; dies gilt sowohl für die volumen- als auch flächenmäßige Betrachtung der Porosität (Bild 85 bzw. Bild 86).

Der umgekehrte Effekt, nämlich eine Verschiebung des RW-Spektrums hin zu tieferen Frequenzen wurde bereits in [] erwähnt und konnte durch diese Messungen nicht bestätigt werden (siehe blauen Graph in Bild 85). Es wird vermutet, dass die Poren-Morphologie dieser Feststellung Rechnung trägt. Einen weiteren Zusammenhang zwischen Volumenporosität und Frequenz zeigt aber die 3dB-Bandbreite² gemessen an der Rückwand (roter Graph). Auch hier konnte mit zunehmender Porosität eine Verbreiterung des Spektrums festgestellt werden. Hieraus abgeleitet werden kann der grüne Graph; dieser beschreibt das Verhältnis der 3dB-Bandbreiten von Rückwand- zu Eintrittsecho.

¹ Dieses Zeropadding fand bei allen Spektralanalysen Anwendung, denn sonst hätte die Frequenzauflösung nicht ausgereicht, um die hochfrequenten US-Pulse zu analysieren. Hierzu ein einfaches Bsp: Bei einer Samplingrate von 1 GS/s, wird in Zeitabständen von 1ns abgetastet, mit einer Signallänge von 200 Punkten (was etwa einer Wellenlänge eines ursprünglichen 10MHz-Pulses gemessen an der Rückwand entspricht), ergibt sich als Frequenzauflösung $\frac{1}{L} = \frac{1}{200 \cdot 10^{-9} \text{ s}} = 0,5 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{s}} = 50 \cdot 10^6 \text{ Hz} = 50 \text{ MHz}$, was nicht ausreichen würde, wenn Frequenzen zwischen 0 und beispielsweise 20 MHz analysiert werden sollen.

² Diese 3dB- Grenze beschreibt die Schwelle, an der die Signalenergie auf die Hälfte abgefallen ist und ist eine in der Ultraschallprüfung gebräuchliche Schwelle

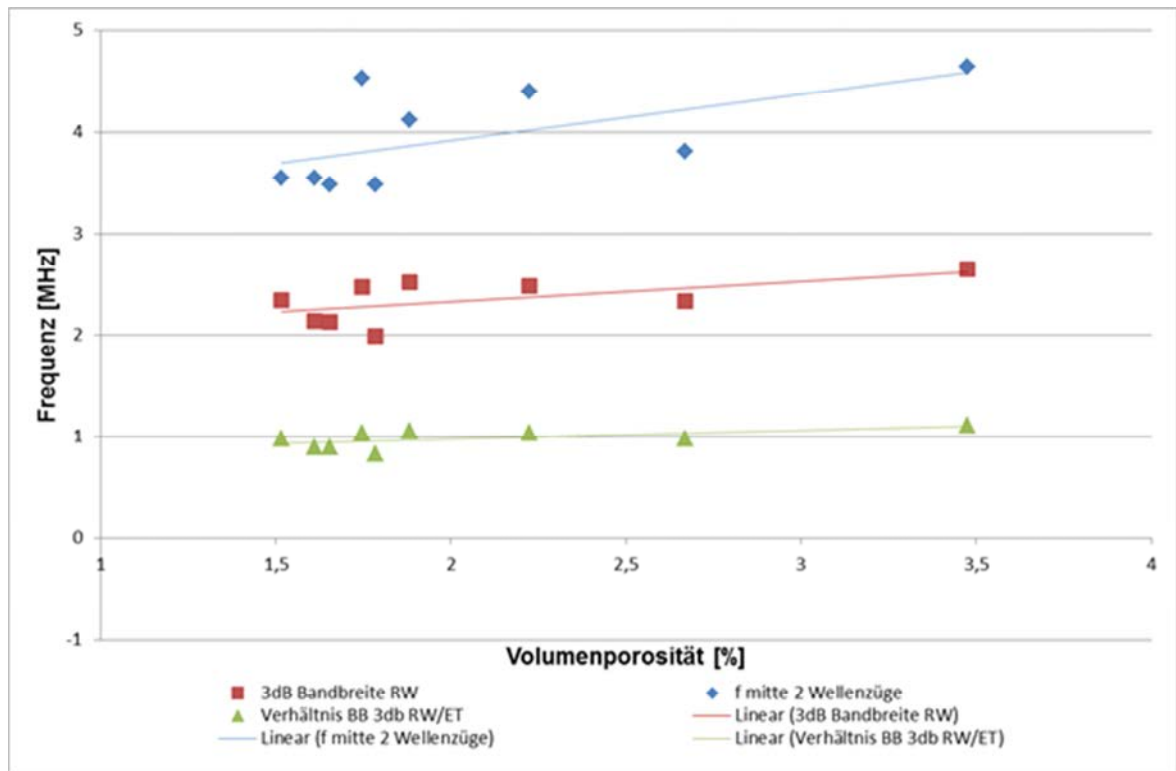


Bild 85: Frequenz über Volumenporosität, Probe 4a

Setzt man den Porositätskennwert Volumenporosität mit den Analyseparametern Mittenfrequenz, 3dB-Bandbreite_{RW} bzw. Verhältnis der Bandbreiten in Beziehung zueinander, so folgt die Frequenz in gewisser Weise der Volumenporosität: Dennoch kann allein aus der Bandbreite, Frequenz oder Bandbreitenverhältnis nicht eindeutig auf die Volumenporosität geschlossen werden, was durch den Vergleich der Datentupel [1-1], [2-2] und [3-3] in Bild 87 auffällt, denn dort liegen beispielsweise die Mittenfrequenzen (rot) des RW-Spektrums dicht beieinander bei deutlich variierenden Werten der Volumenporosität (grün).

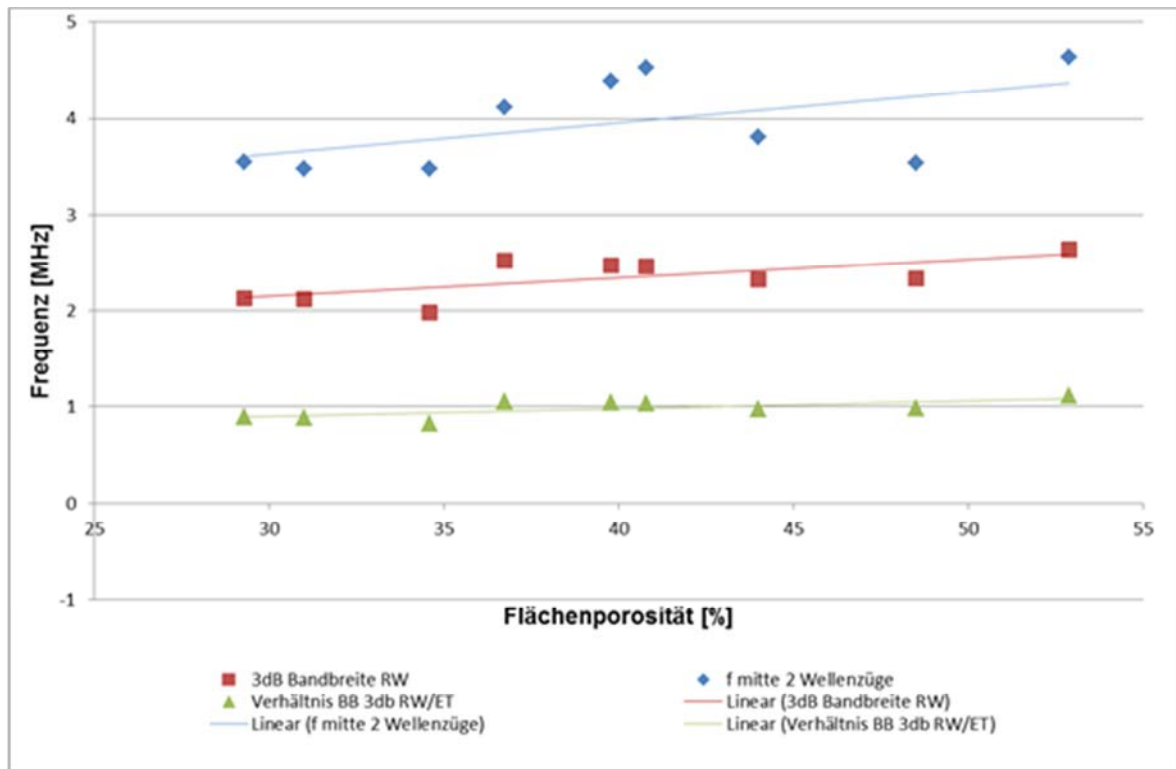


Bild 86: Frequenz über Flächenporosität, Probe 4a

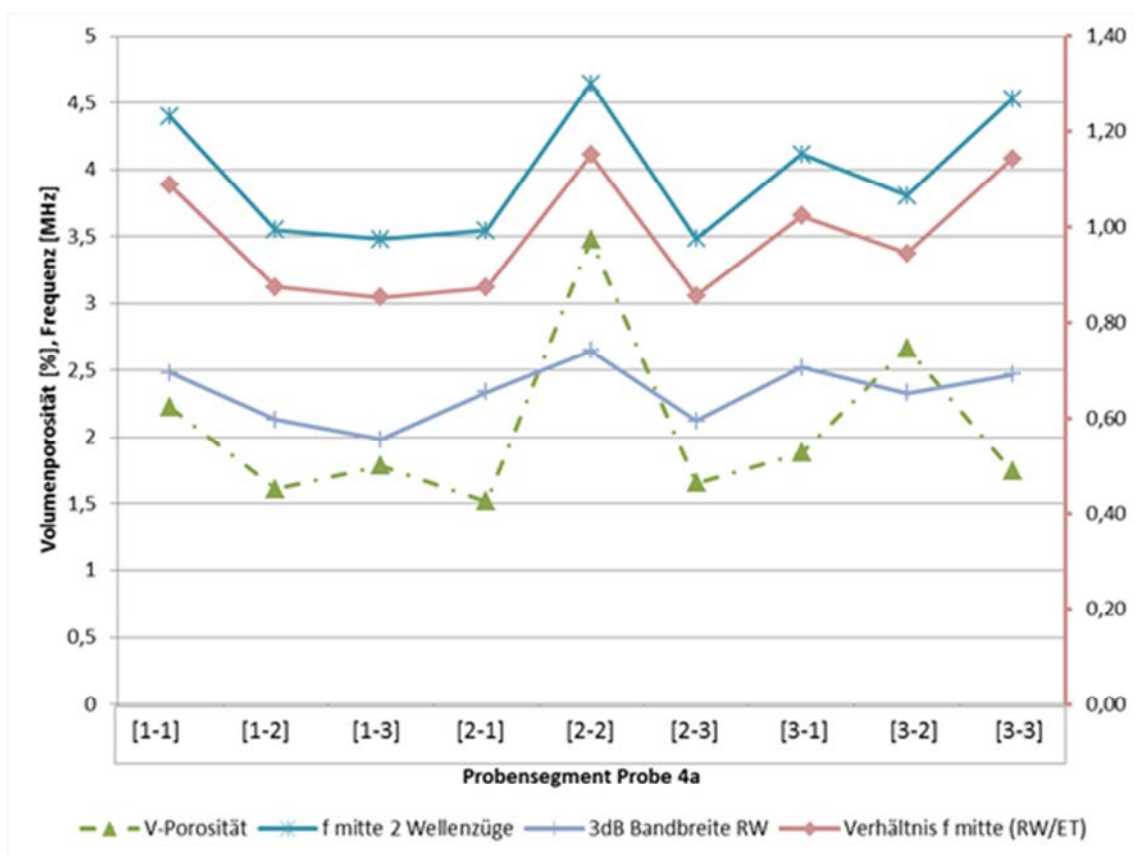


Bild 87: Volumenporosität bzw. Frequenz über Probensegmente [1-1] bis [3-3] der Probe 4a

3.3.4.2 Höherfrequente Messungen

Neben der tiefenbedingten Schall„schwächung“, welche durch die Divergenz des Schallbündels zustande kommt und durch sogenannte Tiefenausgleichskurven kompensiert werden kann, tritt bei der US-Prüfung eine zur Schwächung zusammengefasste Kombination aus Streuung und Absorption des US auf.

Da die Schallschwächung mit steigender Frequenz zunimmt, kann i.A. davon ausgegangen werden, dass die RW-Signale aus höherfrequenten Messungen deutlich geringer ausfallen werden als solche, die niederfrequenten entstammen. Dies lässt sich durch Anheben der Empfangsverstärkung allerdings kompensieren, wie die Gegenüberstellung folgender Messergebnisse verdeutlicht.

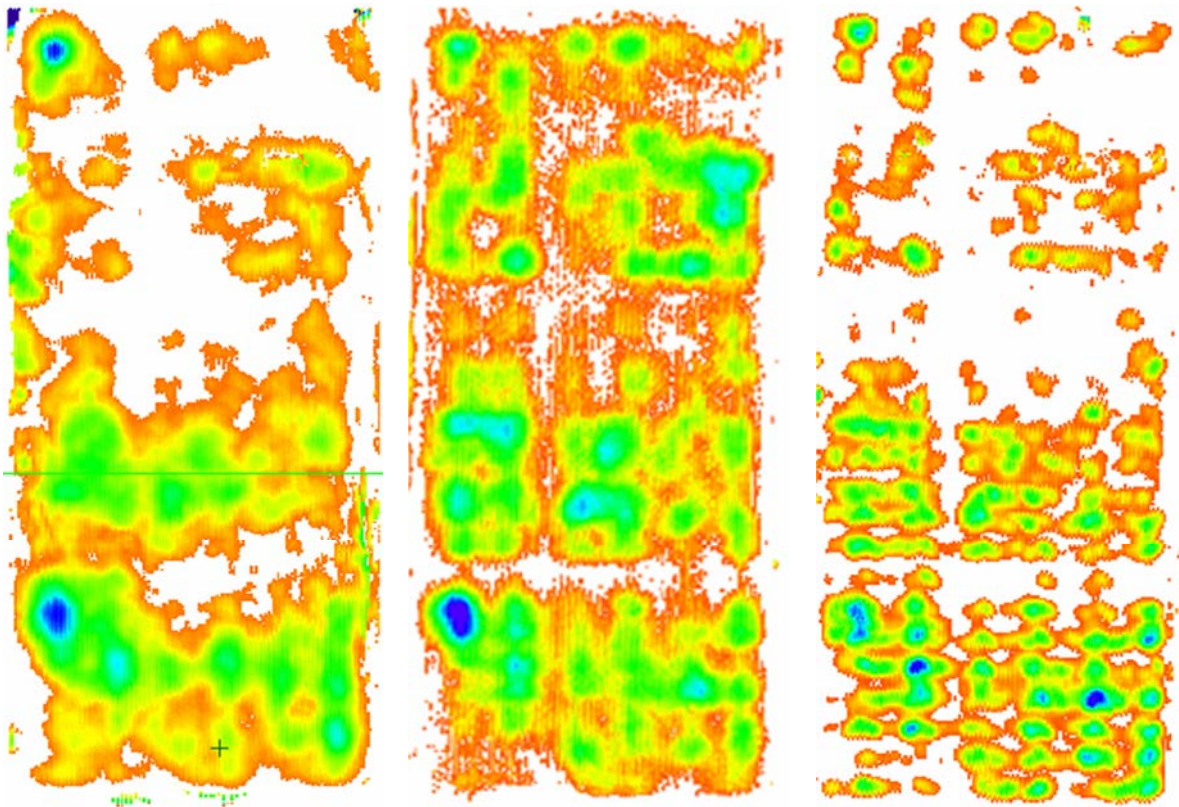


Bild 88: C-Bilder der Probe 4a mit unterschiedlichen Prüffrequenzen (v.l.n.r.: 5, 10 und 15 MHz und zunehmende Empfangsverstärkung v.l.n.r.), eingeschränkt auf den Bereich des Rückwandechos

In sämtlichen in Bild 88 dargestellten Messergebnissen ist der Tiefenbereich auf den Bereich der Rückwand eingeschränkt worden. Deutlich erkennbar ist die gesteigerte Detailtreue mit zunehmender Prüffrequenz. In der rechten Abbildung ist die Frequenz hoch genug (somit die Wellenlänge klein genug), sodass weniger Anteile des Ultraschallimpulses an den in der Probe vorhandenen Poren reflektiert werden. Allerdings ist zu beachten, dass das Maß der Verstärkung endlich ist, somit ist es nicht ausreichend, nur die Frequenz zu steigern. Wirklich entscheidend für die Detektierbarkeit ist der Signal-Rausch-Abstand, d.h. jenes Maß, mit dem sich ein Signaldetail aus dem auch als „Gras“ bezeichneten Rauschen abhebt.

3.3.4.3 Messung mit 15 MHz

Ob der guten Detailerkennbarkeit erhoffte man sich aufschlussreiche Informationen bei der Signalanalyse der 15 MHz- Messungen. Diese Hoffnung wurde nach einigen Untersuchungen mit diesem Prüfkopf zerschlagen, denn selbst bei der Messung des Frequenzspektrums am Kontrollkörper K1 (der kaum Schallschwächung aufweist), konnte mehrfach eine signifikante Frequenzverschiebung im Spektralbereich des ET zum RW-Puls festgestellt werden.

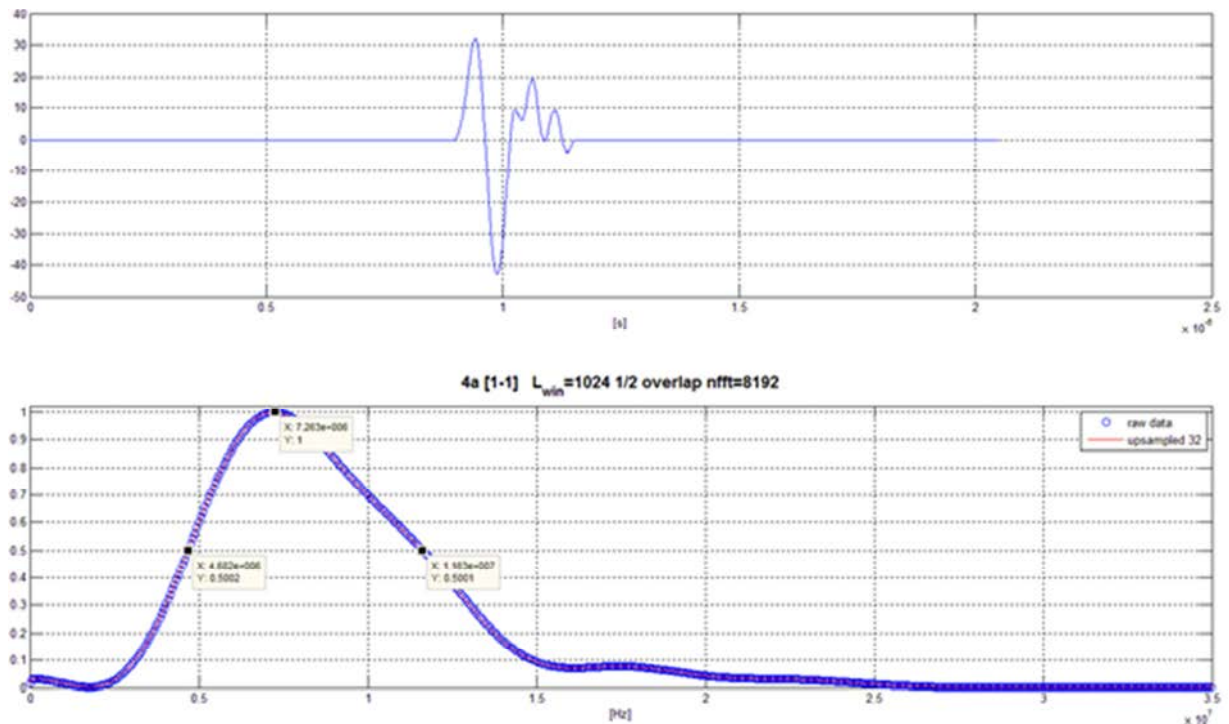


Bild 89: Zeit- und Spektraldarstellung des ET-Pulses am K1, (Mittenfrequenz 7.26 MHz, 3dB-Bandbreite 6.95 MHz)

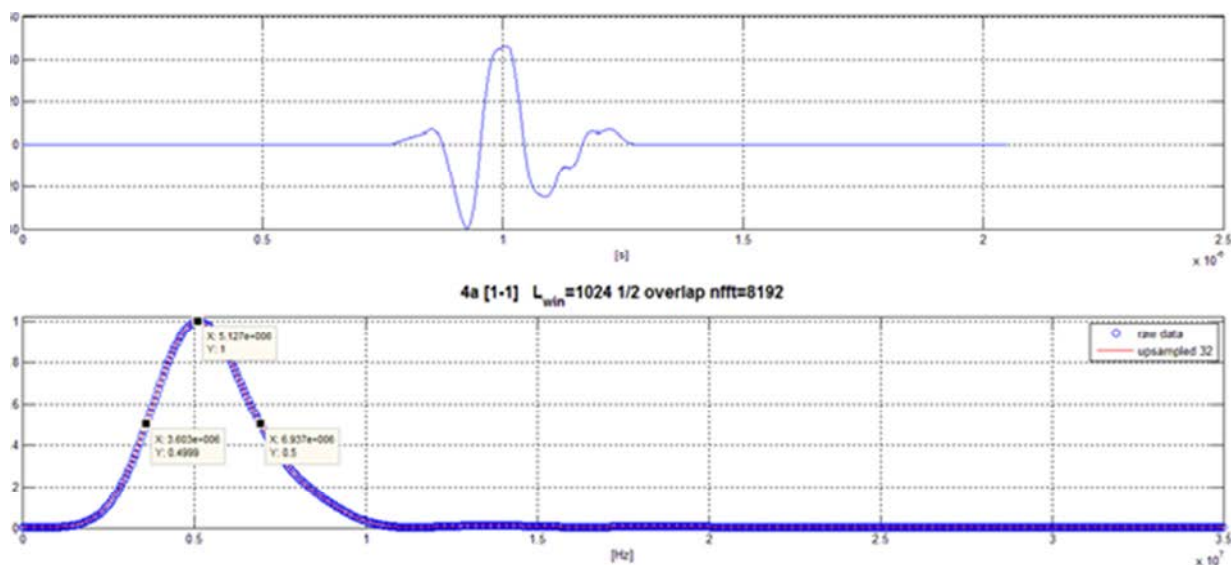


Bild 90: Zeit- und Spektraldarstellung des RW-Pulses am K1, (Mittenfrequenz 5.13 MHz, 3dB-Bandbreite 3.33 MHz)

Aufgrund dieser Feststellung musste man von der Signalanalyse mit diesem Prüfkopf absehen, denn wenn schon die Interpretation des Spektrums am wohlbekannten Kontrollkörper K1 Fragen aufwirft, wird die Interpretation an strukturell komplexeren Werkstoffen (wie CFK) ungleich fragwürdiger. Die zunächst unerwartete Feststellung der deutlich unterschiedlichen Spektren könnte dadurch erklärt werden, dass die Nahfeldlänge eine Funktion der Schwingergeometrie und der Prüffrequenz ist. Da der 15 MHz-Prüfkopf ein eher breitbandiges Spektrum aufweist, also polychromatische λ_i vorliegen, so ist der Fokuspunkt (N =Nahfeldlänge, siehe Abbildung 18) für unterschiedliche Frequenzen f_i in unterschiedlicher Tiefe zu erwarten. Bei der Messung des Spektrums am K1 wurde der Fokuspunkt auf den Eintritt gelegt. Hinter diesem Punkt divergiert das Schallfeld weiter und zwar proportional zur Frequenz (sprich die höheren Frequenzen stehen an der Rückwand nicht mehr zur Verfügung). Die nachfolgende Skizze möge dies verdeutlichen, zusätzlich verstärkt sich bei einem Fokus-Prüfkopf (wie es der 15 MHz-Prüfkopf ist) der Effekt der frequenzabhängigen Nahfeldlänge bzw. des Öffnungswinkels.

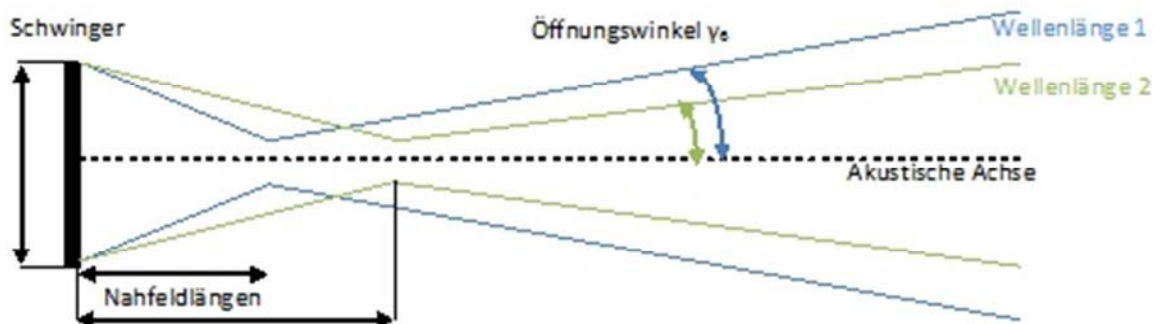


Bild 91: Skizze zur Verdeutlichung der frequenzabhängigen Nahfeldlänge und Bündeldivergenz, hierbei ist $\lambda_1 < \lambda_2$

Nachdem aus oben genannten Gründen auf die Signalanalyse mit dem 15 MHz-Fokusprüfkopf verzichtet werden musste, sollen hier dennoch die US-Ergebnisse in Form von Projektionsbildern kurz umrissen werden. In nachfolgender Abbildung 19 ist links der CT-äquivalente Bereich im Tiefenbereich der Rückwand dargestellt, rechts die 3D-Visualisierung der XCT-Aufnahme. Deutlich zu erkennen sind die ausgezeichneten Punkte 1 bis 6, an denen die Amplitude des RW-Echos sich deutlich von jenen anderer Stellen abhebt. Beim Vergleich mit der XCT-Aufnahme wird ersichtlich, dass genau an diesen Stellen keine Poren die Ausbreitung des Schalls beeinflusst haben konnten.

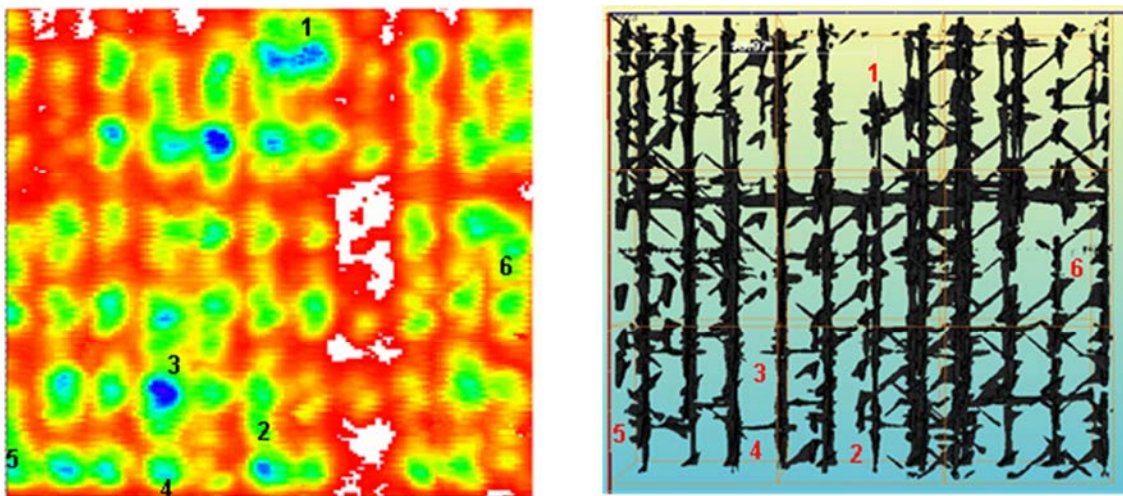


Bild 92: C-Bild (l.) und XCT-Bild (r.) des untersuchten Probenbereichs der Probe 4a

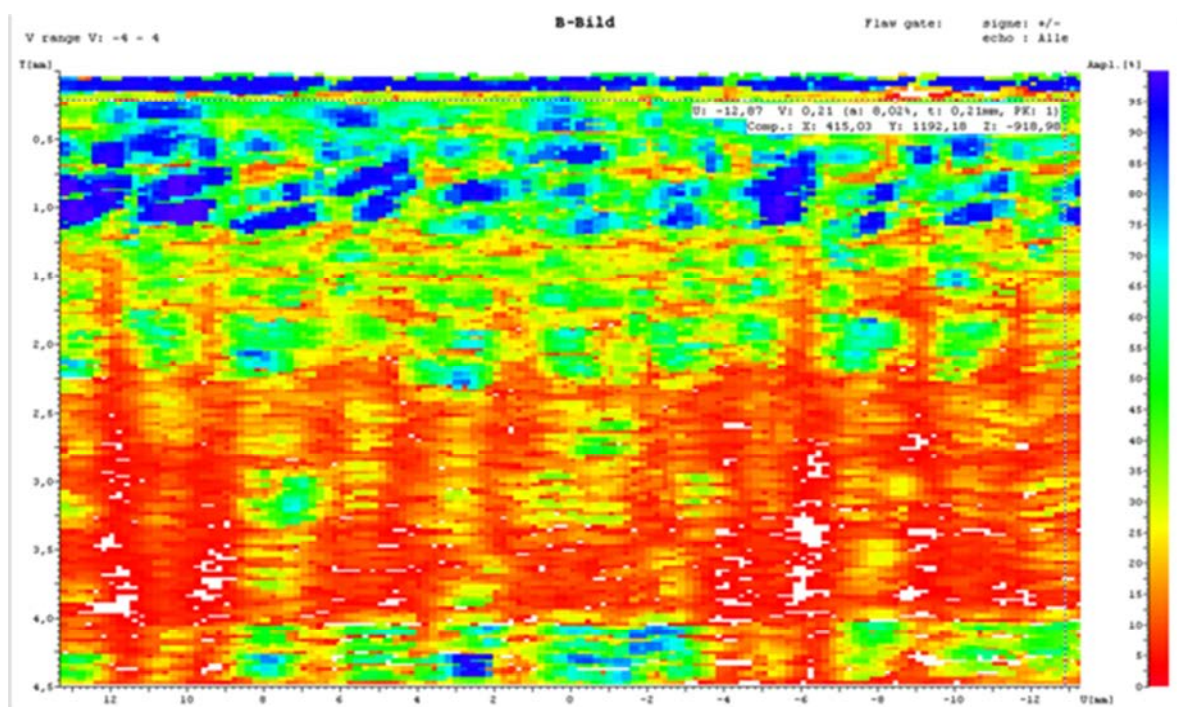


Bild 93: B-Bild des CT-äquivalenten Bereichs der Probe 4a

In obigem Bild 93 ist ein B-Bild des Bereichs aus Abbildung 19 dargestellt. Aus diesem wird ersichtlich, dass eine Bewertung von Fehlern bzw. Ungängen erst ab einer Tiefe ab ca. 0,25mm erfolgen kann, denn die Amplitude des Eintrittsechos in die CFK-Platte fällt erst in dieser Tiefe ab (symbolisiert durch rot gestrichelte Markierung). Vergleicht man nun die XCT- mit den US-C-Bild-Aufnahmen in einer bestimmten Tiefe, so zeigt sich beispielsweise für eine Tiefe von 0,5 bis 1,0 mm Folgendes:

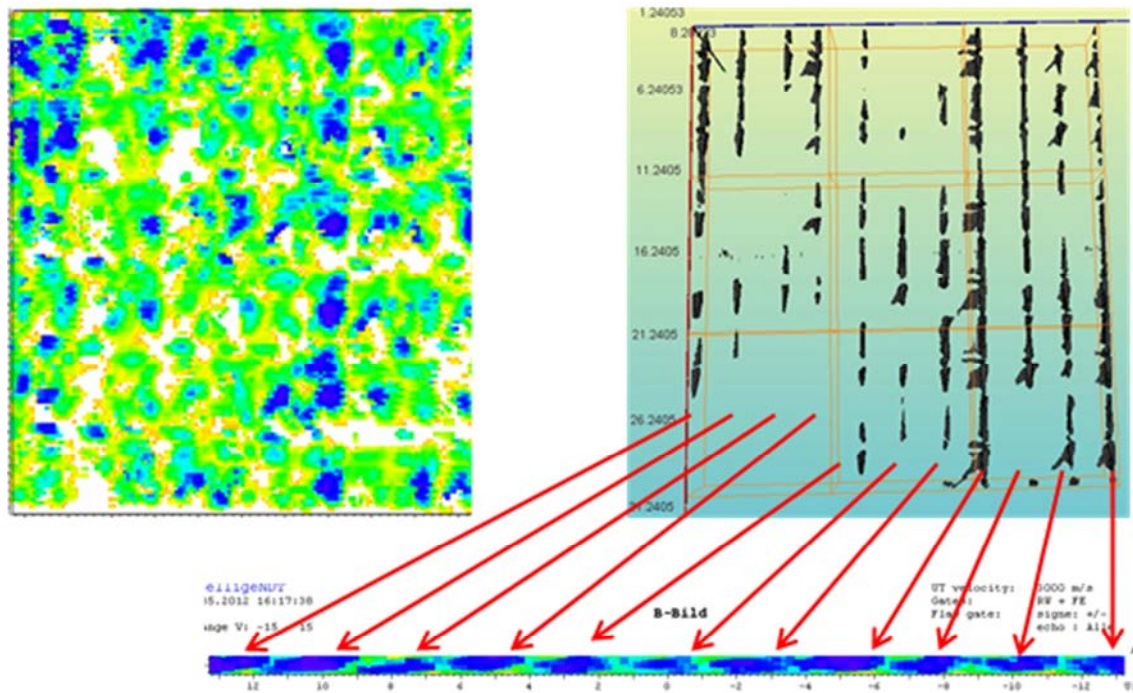


Bild 94: C-Bild (links), XCT-Aufnahme(rechts) und B-Bild des CT-äquivalenten Bereichs in einer Tiefe von 0,5 bis 1mm

Es ist zu beachten, dass bei Betrachtungen der US-Daten mit zunehmender Tiefe bereits eine Abschattung des Schalls erfolgt ist aufgrund von darüber liegenden Reflektoren. Im Folgenden ist eine Gegenüberstellung von US-C-Bild mit der XCT-Aufnahme in einem Tiefenbereich von 1,6mm bis 2,4mm dargestellt. Auch hier korrelieren die von 1 bis 10 indizierten Strukturen.

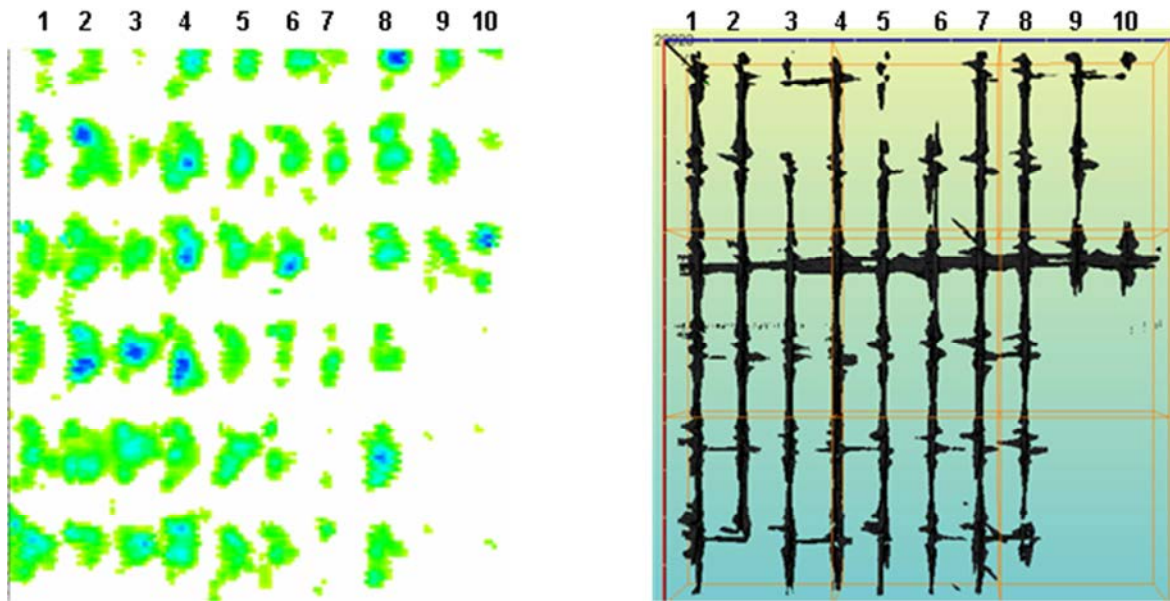


Bild 95: C-Bild (l.) und XCT-Aufnahme (r.) in einer Tiefe von 1,6 bis 2,4mm

3.3.4.4 Messung mit 10 MHz

Nach dem Vergleich des ET- und RW-Spektrums für den 15 MHz-Prüfkopf und der Entscheidung, diesen Prüfkopf nicht für die Signalanalyse zu verwenden, wurde die Probe einer Messung mit einem 10 MHz-Prüfkopf unterzogen. Beim Vergleich des ET- mit dem des RW-Spektrums an einem 20mm starken Plexiglas® stellte sich gemäß Erwartung eine Frequenzverschiebung hin zu tieferen Frequenzen ein, da Plexiglas® einen deutlich höheren Schallschwächungskoeffizient besitzt als Stahl.

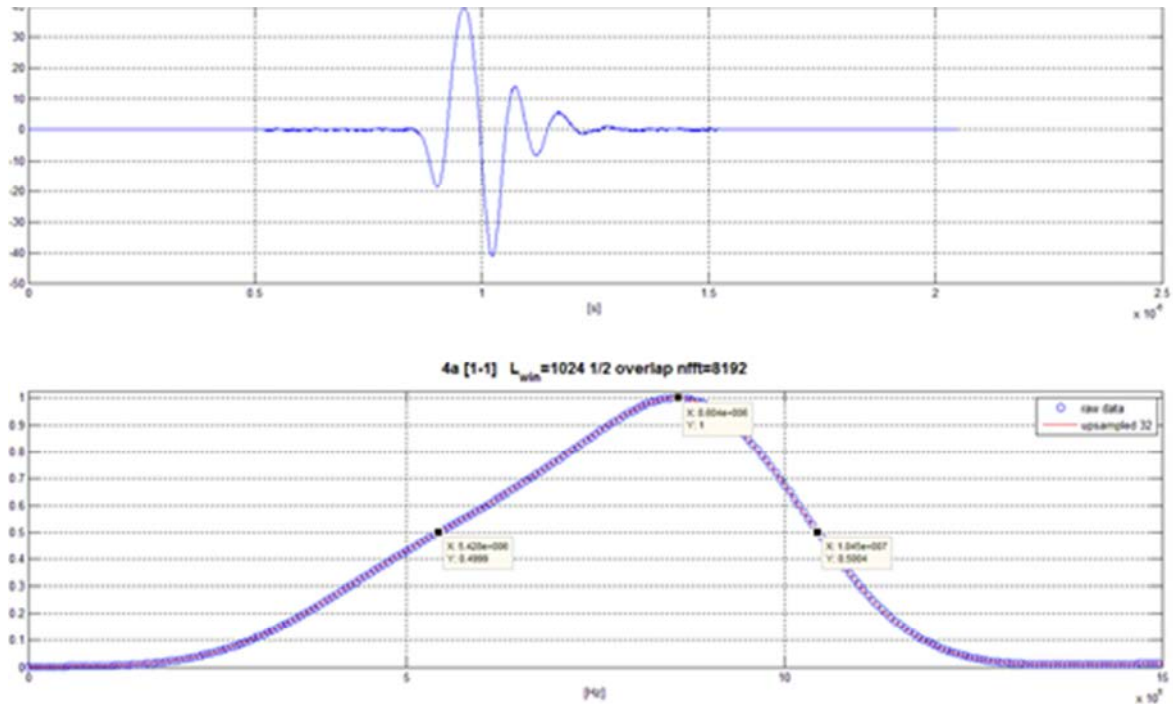


Bild 96: Zeit- (oben) und Spektraldarstellung (unten) des 10MHz- ET-Pulses, Mittenfrequenz 8.60 MHz, 3dB-Bandbreite 5.02 MHz

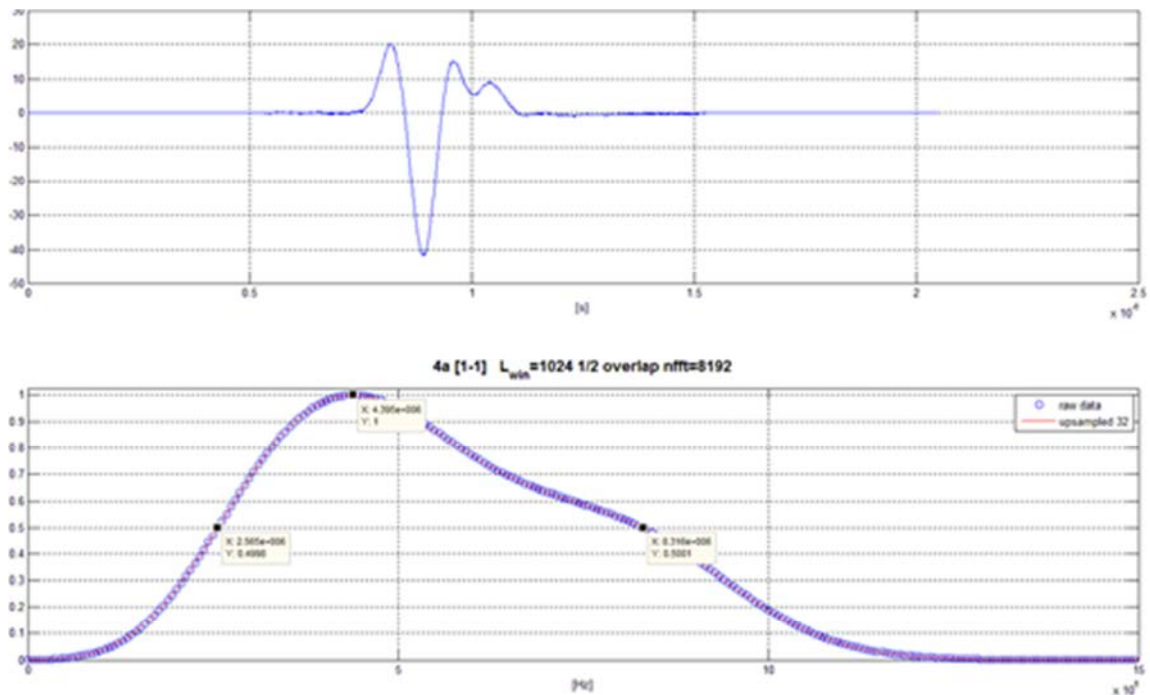


Bild 97: Zeit- (oben) und Spektraldarstellung (unten) des 10MHz- RW-Pulses, Mittenfrequenz 4.4 MHz, 3dB-Bandbreite 5.75 MHz

Im nächsten Schritt wurden mit diesem 10 MHz- Prüfkopf an drei ausgezeichneten Stellen jeweils die A-Bilder aufgezeichnet, Bild 98 gibt hierfür einen Überblick. Von links nach rechts wurden jeweils andere Tiefenbereiche und teils andere Farbcodierungen verwendet, sodass ein Reflektor aus einer bestimmten Graphik nicht

zwangsläufig in einer anderen Graphik wiederzufinden ist. Im Anschluss an die C-Bild-Darstellungen werden zu jeder Probenposition B-Bilder verknüpft mit den entsprechenden A-Bildern dargestellt.

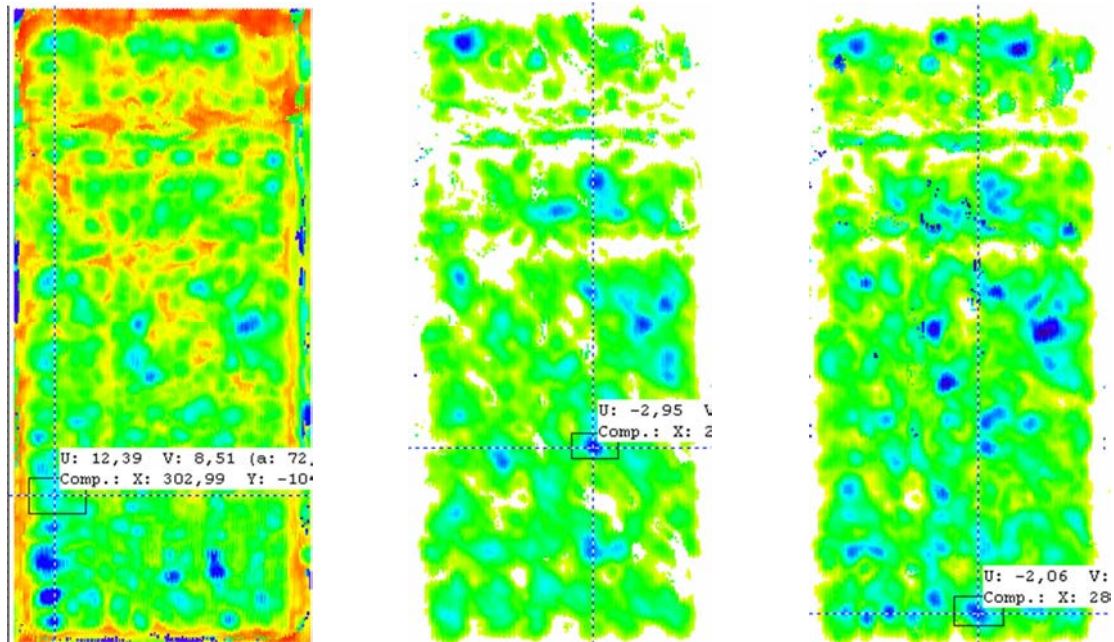


Bild 98: C-Bilder verschiedener Probenpositionen, Benennung v.l.n.r.: 4a_00, 4a_01, 4a_02

3.3.4.4.1 Position 4a_00

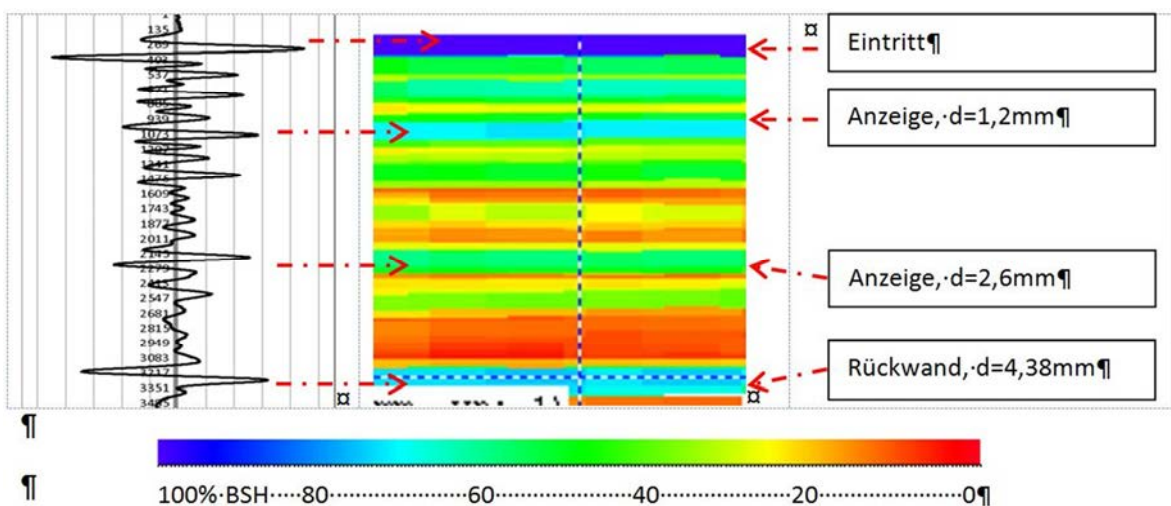


Bild 99: A- und B-Bild, sowie Deklaration der Anzeigen zur Position 00 der Probe 4a

Im Bild 99 ist links das A Bild und rechts daneben das entsprechende B-Bild dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die Korrelation einer hohen Amplitude im A-Bild mit der der Farbcodierung entsprechenden dunkelbläulichen Färbung im B-Bild. Bei der Analyse des A-Bildes aus oben stehender Abbildung fielen neben der ho-

hen Amplitude der Rückwand zwei weitere relativ hohe Amplituden auf, die als Anzeigen in unterschiedlichen Tiefen ($d=1,2$ und $d=2,6\text{mm}$) deklariert wurden. Zunächst soll aber Augenmerk auf das Spektrum des ET-Pulses gelegt werden:

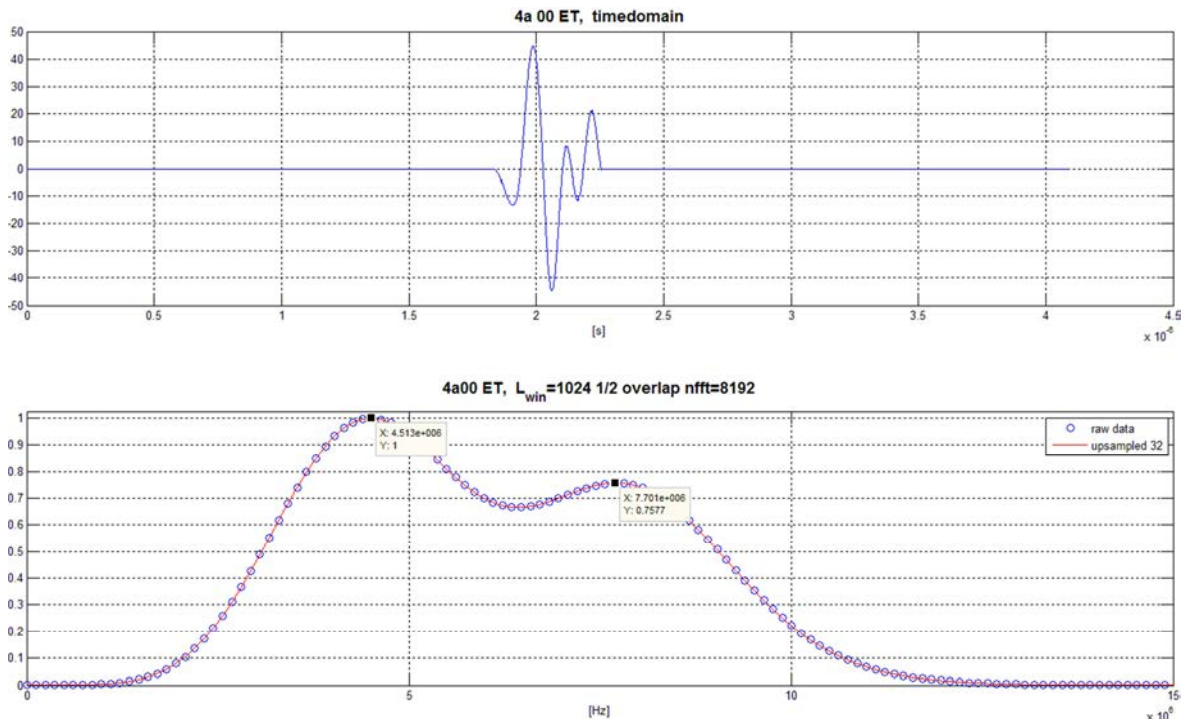


Bild 100: Zeit- und Spektraldarstellung des ET-Pulses gemessen an Probenposition 4a_00

Beim Vergleich dieses ET-Spektrums mit dem ET-Spektrum gemessen an Plexiglas (siehe u.a. Bild 97) fiel neben dem Hauptmaximum bei 4,51 ein zweites Maximum bei 7,70 MHz auf. Da dieser Effekt im -vergleichen mit CFK- homogenen Plexiglas nicht festgestellt werden konnte, liegt eine Interferenz des ET-Echos mit dem Lagenaufbau nahe.

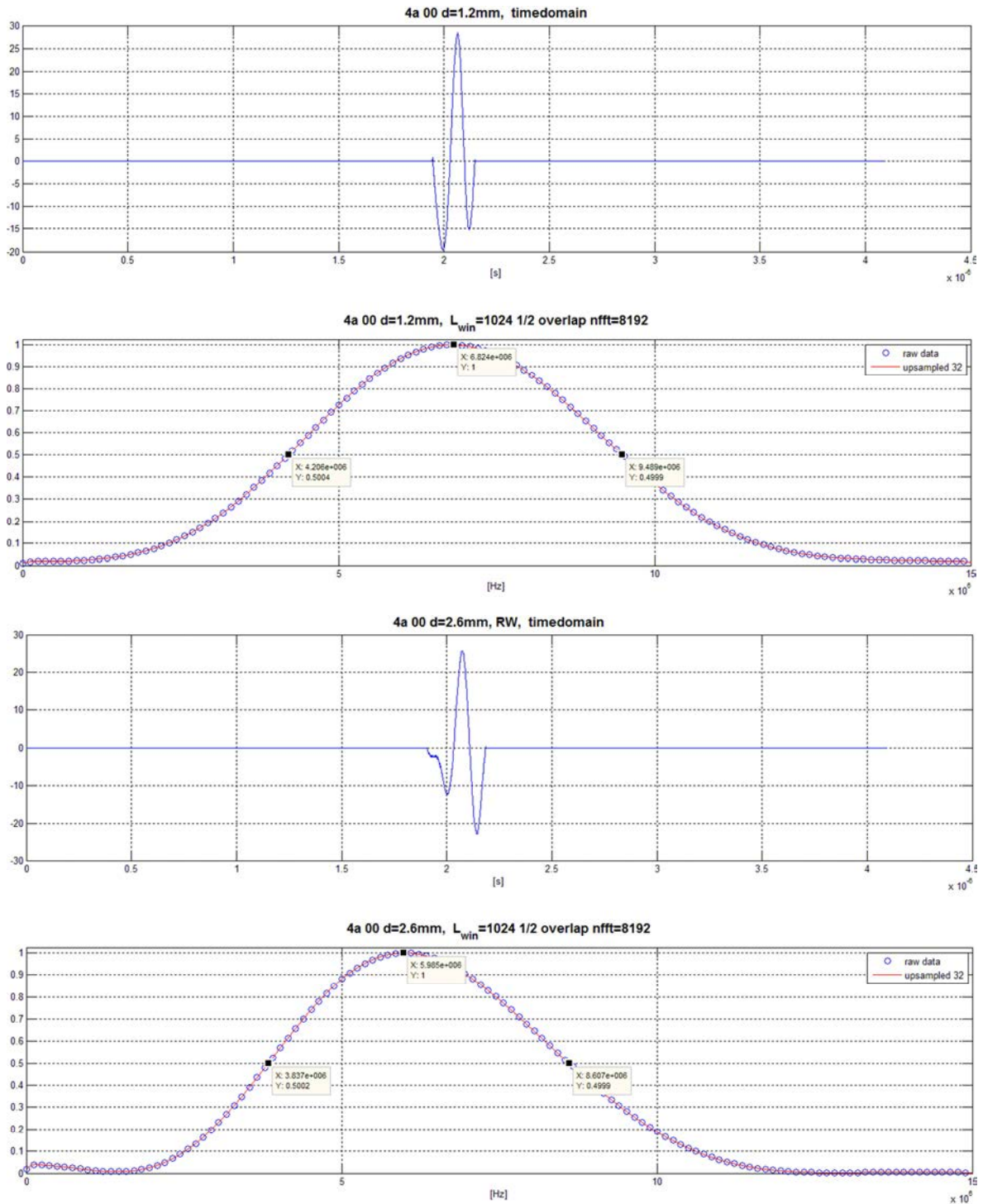


Bild 101: Zeit- und Spektraldarstellung der an Probenposition 4a_00 indizierten Anzeigen bei 1.2 (oben) bzw. 2.6mm (unten), Mittenfrequenz 6.82 bzw. 5.99, 3dB- Bandbreite 5,28 bzw. 4.77 MHz.

Die Spektren der Anzeigen in 1,2 bzw. 2,6mm Tiefe ähneln sich sehr stark (Mittenfrequenz 6,82 bzw. 5,99 MHz, 3dB-Bandbreite 5,28 bzw. 4,77 MHz) und scheinen keine Rückschlüsse auf die lokalen Porositätskennwerte ziehen zu lassen.

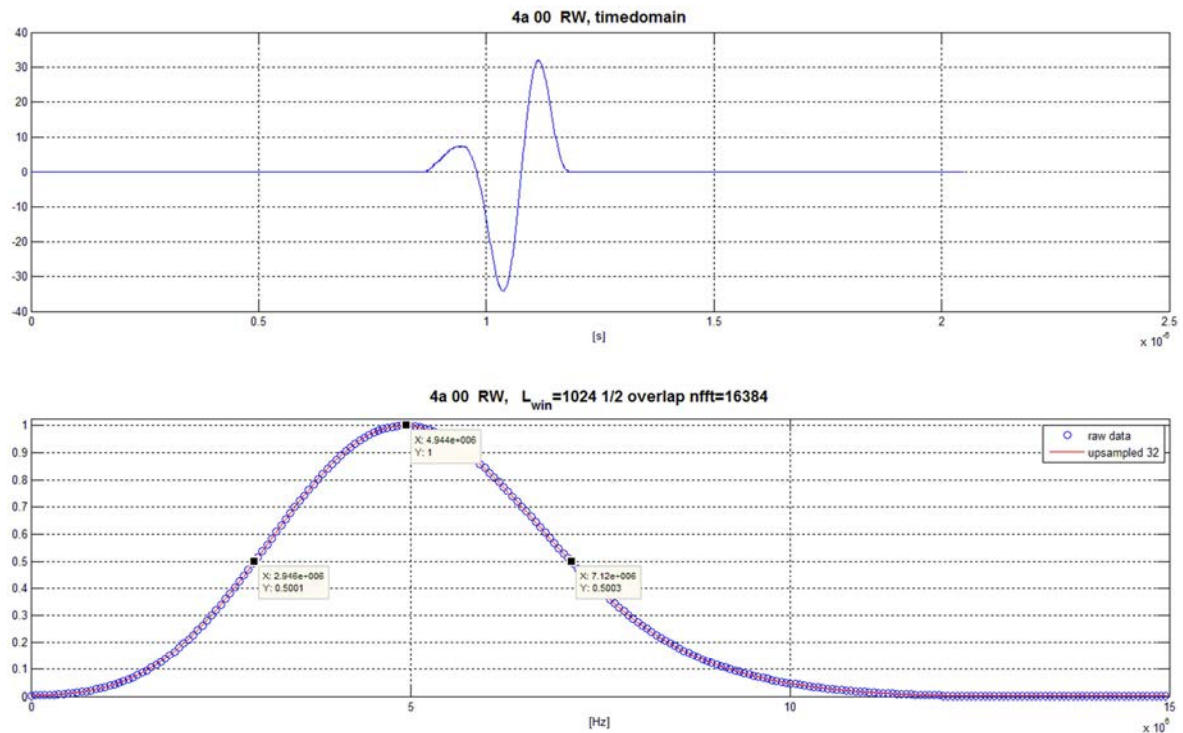


Bild 102: Zeit- und Spektraldarstellung des an Probenposition 4a_00 aufgenommenen RW-Pulses, Mittenfrequenz 4,94 MHz, 3dB- Bandbreite 4,17 MHz

3.3.4.4.2 Position 4a_01

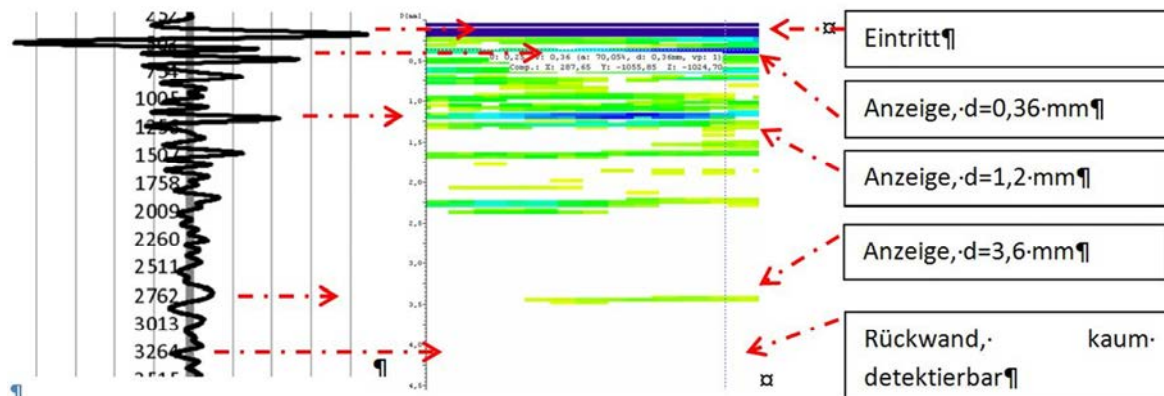


Bild 103: A- und B-Bild, sowie Deklaration der Anzeigen zur Position 01 der Probe 4a

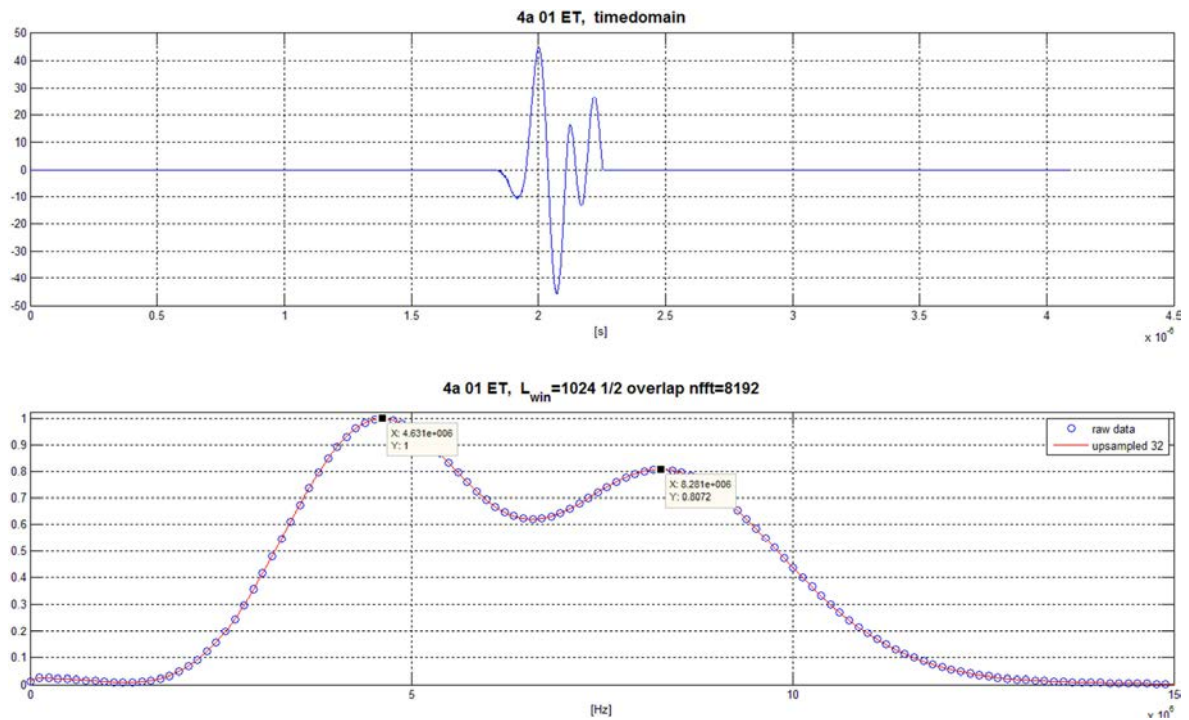
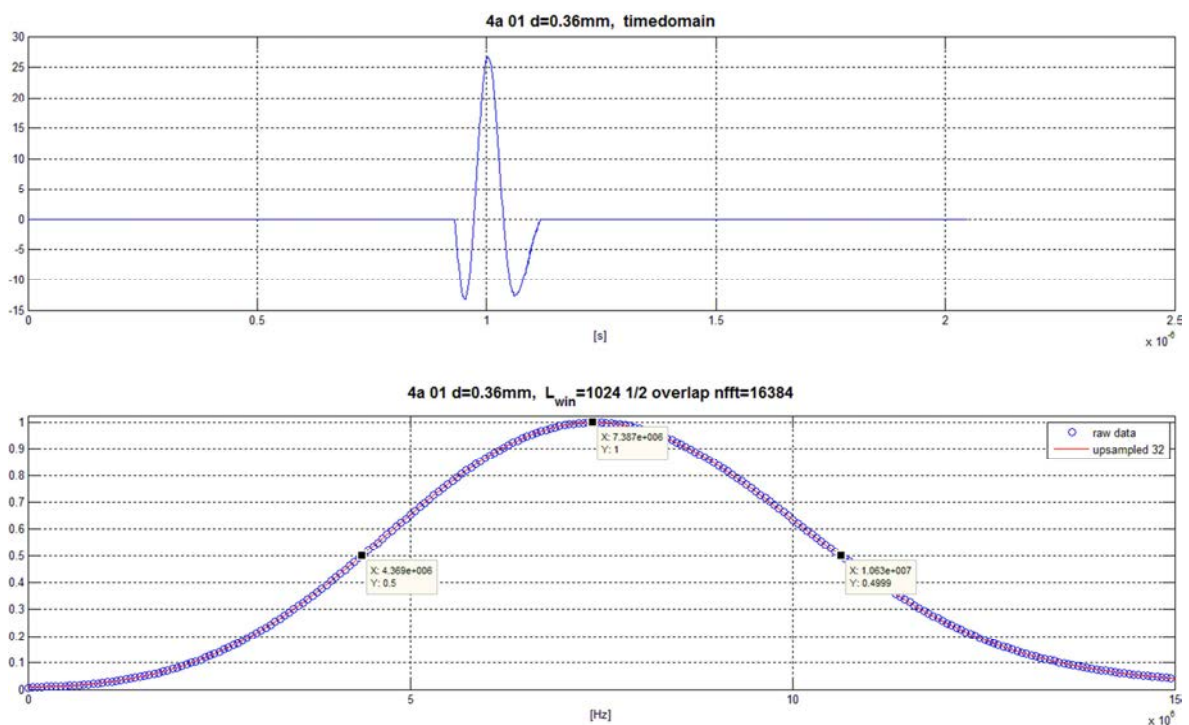


Bild 104: Zeit- und Spektraldarstellung des an Probenposition 4a_01 aufgenommenen ET-Pulses, Mittenfrequenzen 4.63 und 8.28 MHz

Analog zur Probenposition 4a_00 zeigt auch die Position 4a_01 bei der Analyse des ET-Spektrums neben einem globalem Maximum bei 4.63 MHz ein lokales bei 8.28 MHz, weshalb auch hier von einer Interferenz des ET-Pulses mit den ersten Lagen ausgegangen wird.



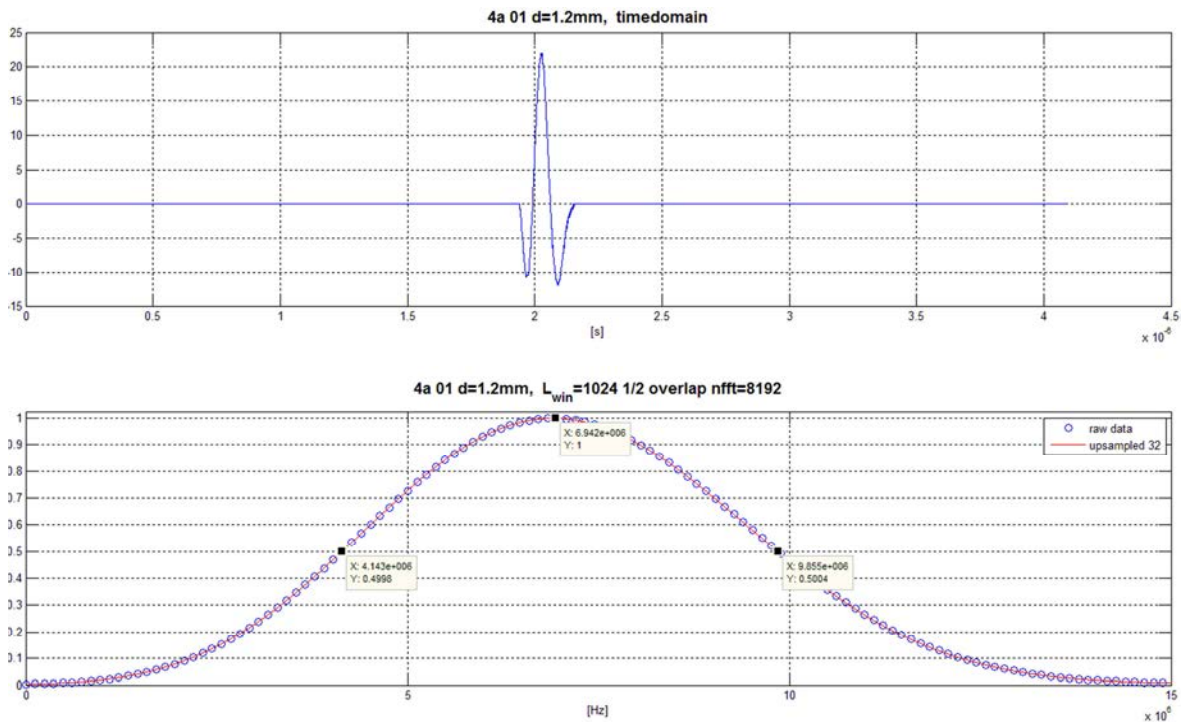


Bild 105: Zeit- und Spektraldarstellung der an Probenposition 4a_01 indizierten Anzeigen bei 0,36 (oben) bzw. 1,26mm (unten), Mittenfrequenz 7.39 bzw. 6.94 MHz, 3dB- Bandbreite 6.26 bzw. 5.71 MHz

Nicht nur hinsichtlich der Bandbreite, sondern auch des Maximums weisen die Signale der bei 0,36 bzw. 1,2mm Tiefe indizierten Anzeigen Ähnlichkeit im Spektralbereich auf. Die Anzeige, die in einer Tiefe von 3,6mm detektiert wurde, unterscheidet sich dagegen deutlich in Frequenz und Bandbreite, wie die nachfolgende Bild 106 zeigt:

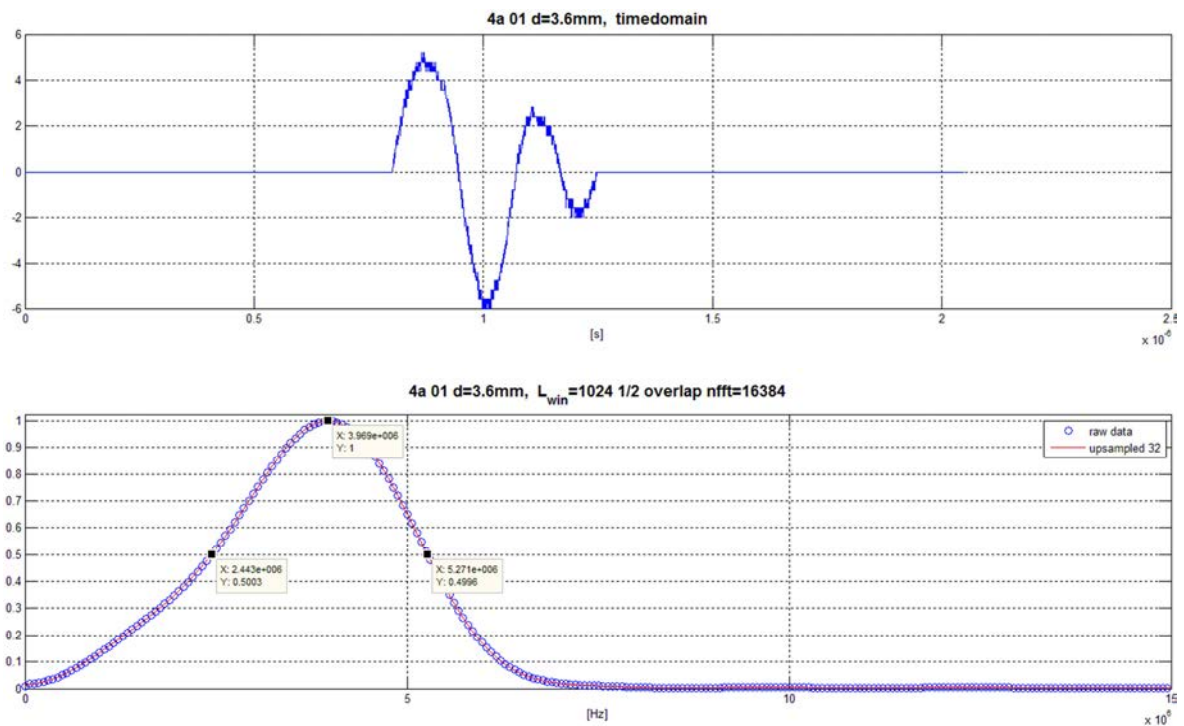


Bild 106: Zeit- und Spektraldarstellung des an Probenposition 4a_01 aufgenommenen Pulses bei einer Tiefe von 3.6mm, Mittenfrequenz 3.97 und Bandbreite 2.83 MHz

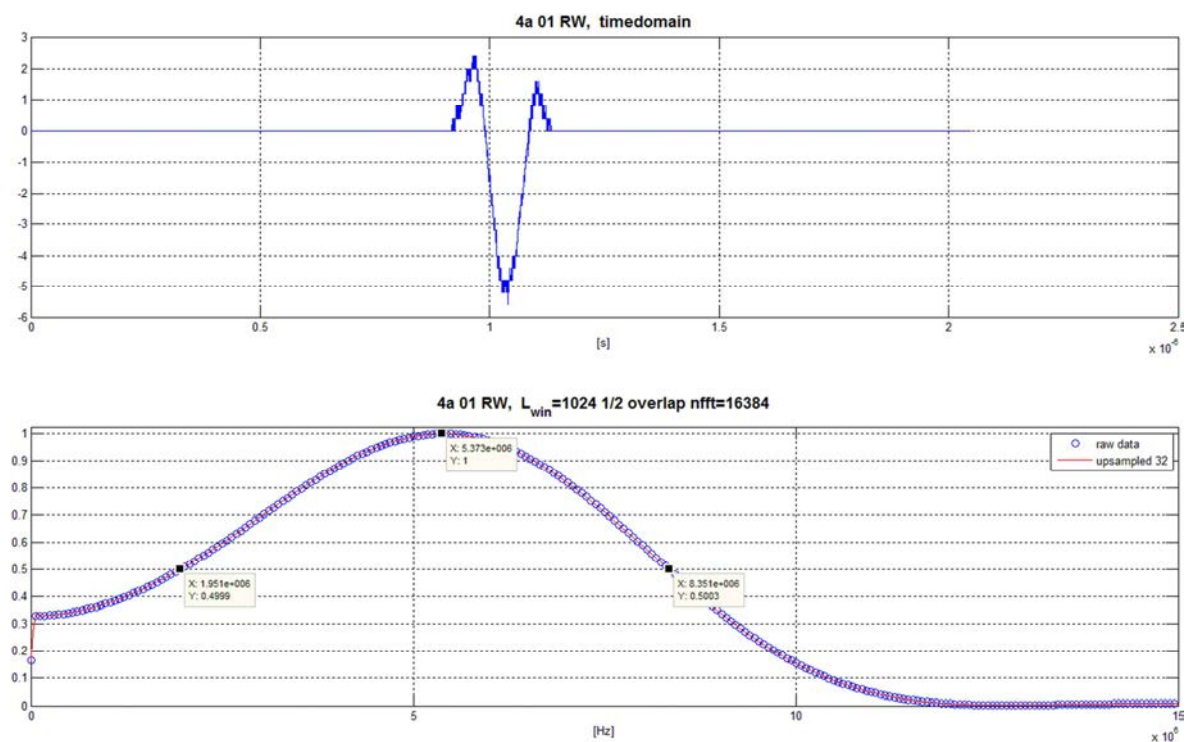


Bild 107: Zeit- und Spektraldarstellung des an Probenposition 4a_01 aufgenommenen RW-Pulses, Mittenfrequenz: 5,37MHz, 3dB-Bandbreite 6,40 MHz

3.3.4.4.3 Position 4a_02

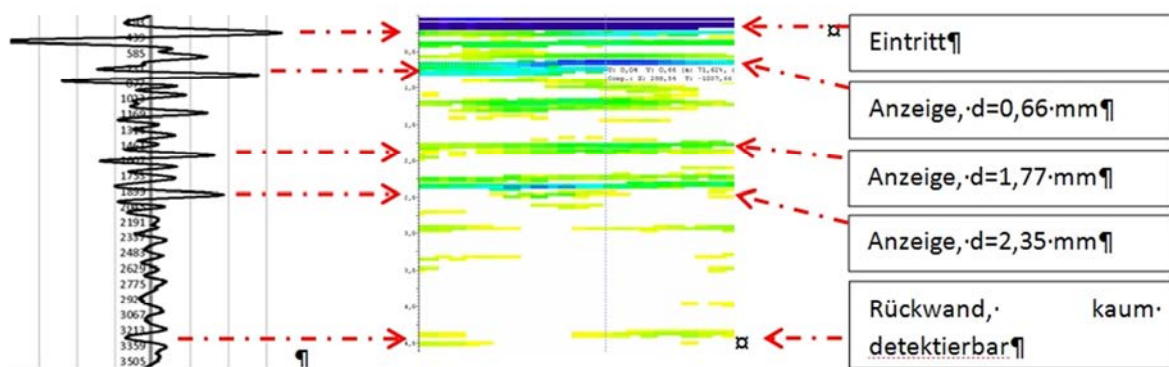


Bild 108: A- und B-Bild, sowie Deklaration der Anzeigen zur Position 02 der Probe 4a

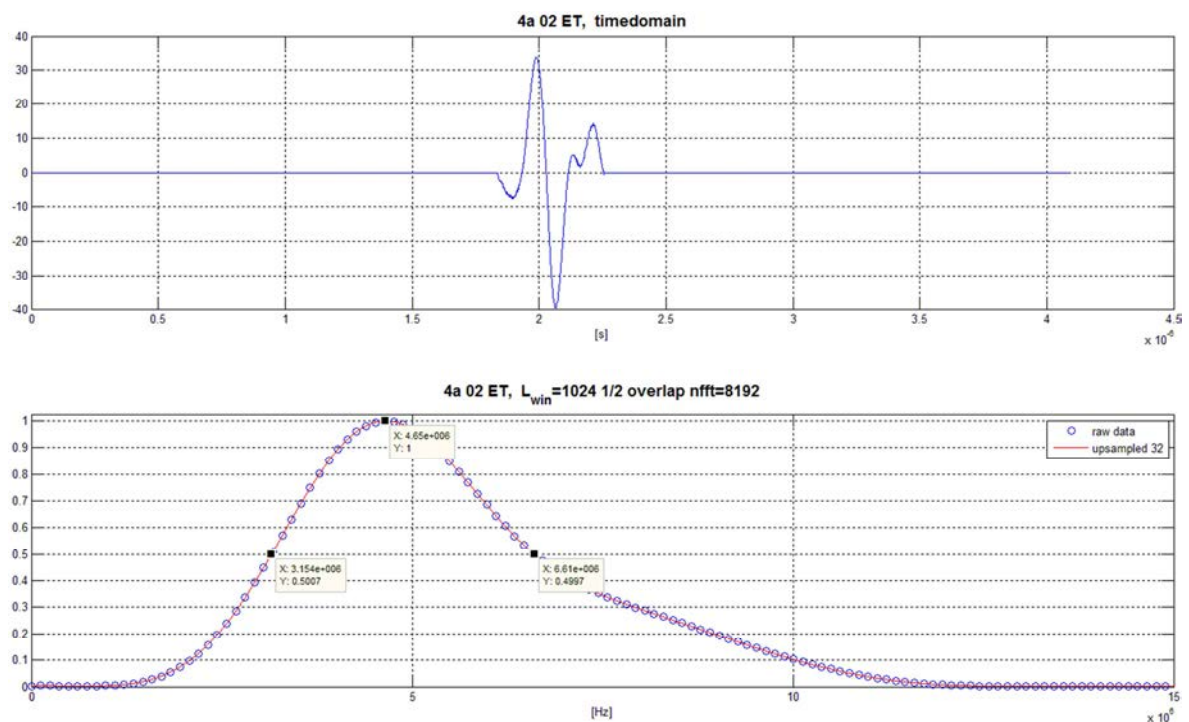


Bild 109: Zeit- und Spektraldarstellung des an Probenposition 4a_02 aufgenommenen ET-Pulses, Mittenfrequenz: 4.65 MHz, 3dB-Bandbreite 3.46 MHz

Verglichen mit den ET-Spektren der Positionen 4a_00 bzw. 4a_01 zeigt sich beim ET-Spektrum der Position 4a_02 kein zweites lokales Maximum bei höherer Frequenz. Dennoch zeichnet sich im Spektrum ab, dass höhere Frequenzanteile vorhanden sind (am breiten Auslaufen des Spektrums zu erkennen).

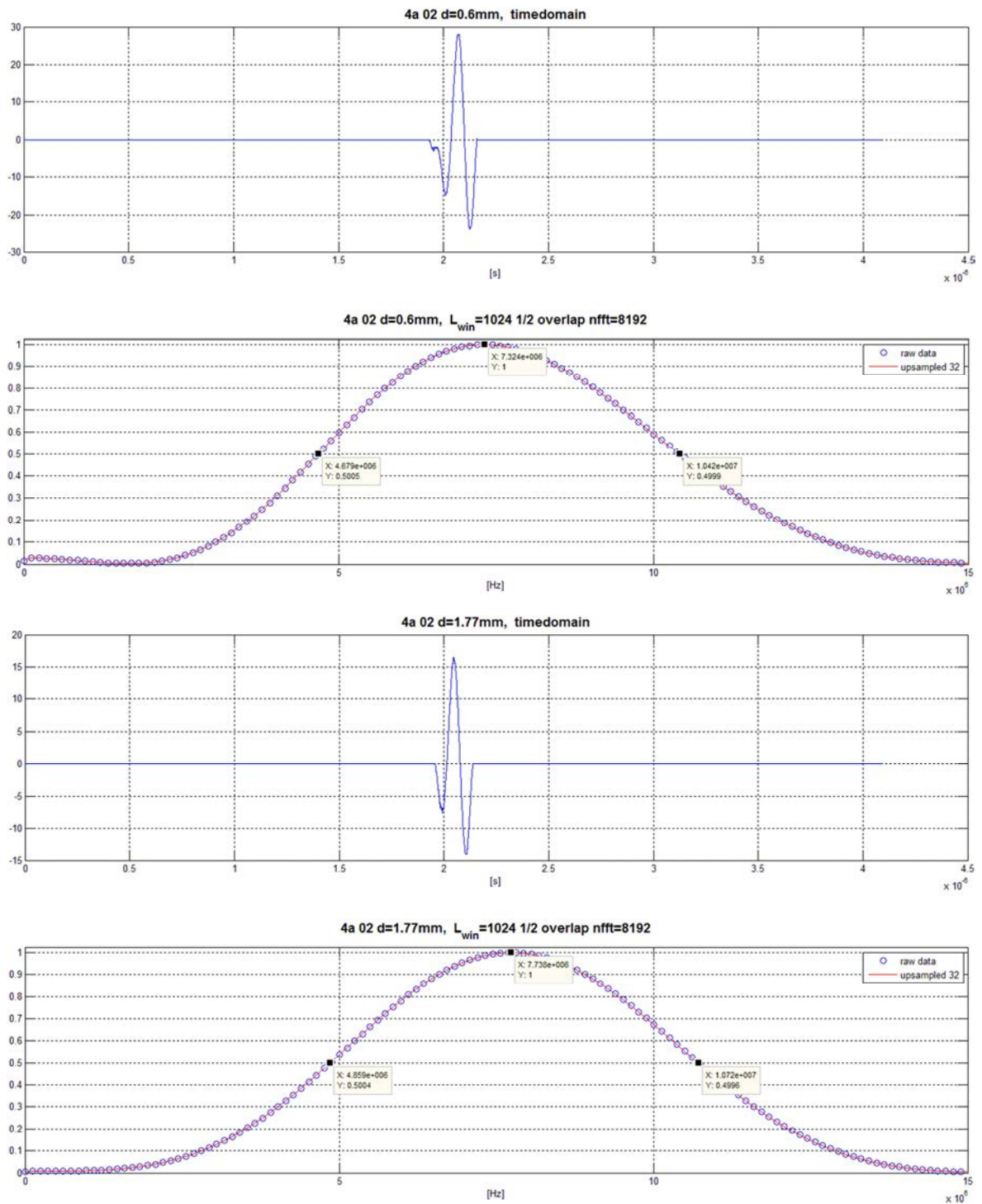


Bild 110: Zeit- und Spektraldarstellung der an Probenposition 4a_02 indizierten Anzeigen bei 0.66 (oben) bzw. 1.77mm (unten), Mittenfrequenz 7.32 bzw. 7.73 MHz, 3dB- Bandbreite 5.74 bzw. 5.86 MHz

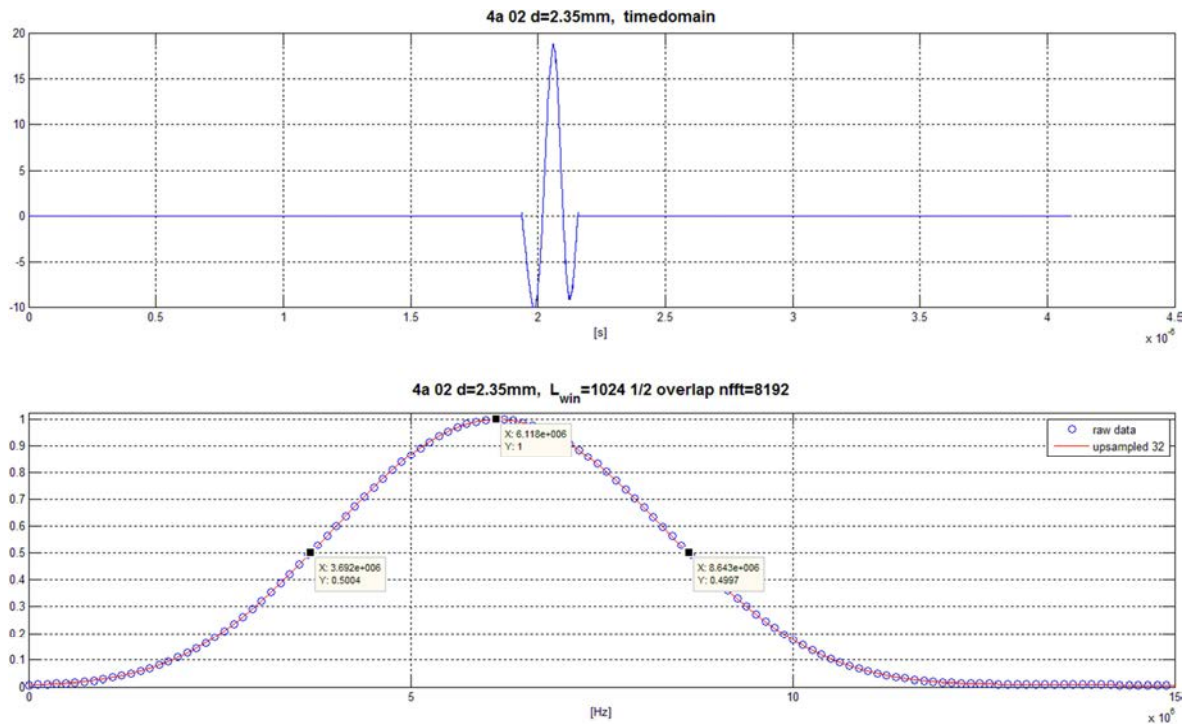


Bild 111: Zeit- und Spektraldarstellung der an Probenposition 4a_02 indizierten Anzeige bei 2,35mm. Mittenfrequenz 6.12 und Bandbreite 4.95 MHz.

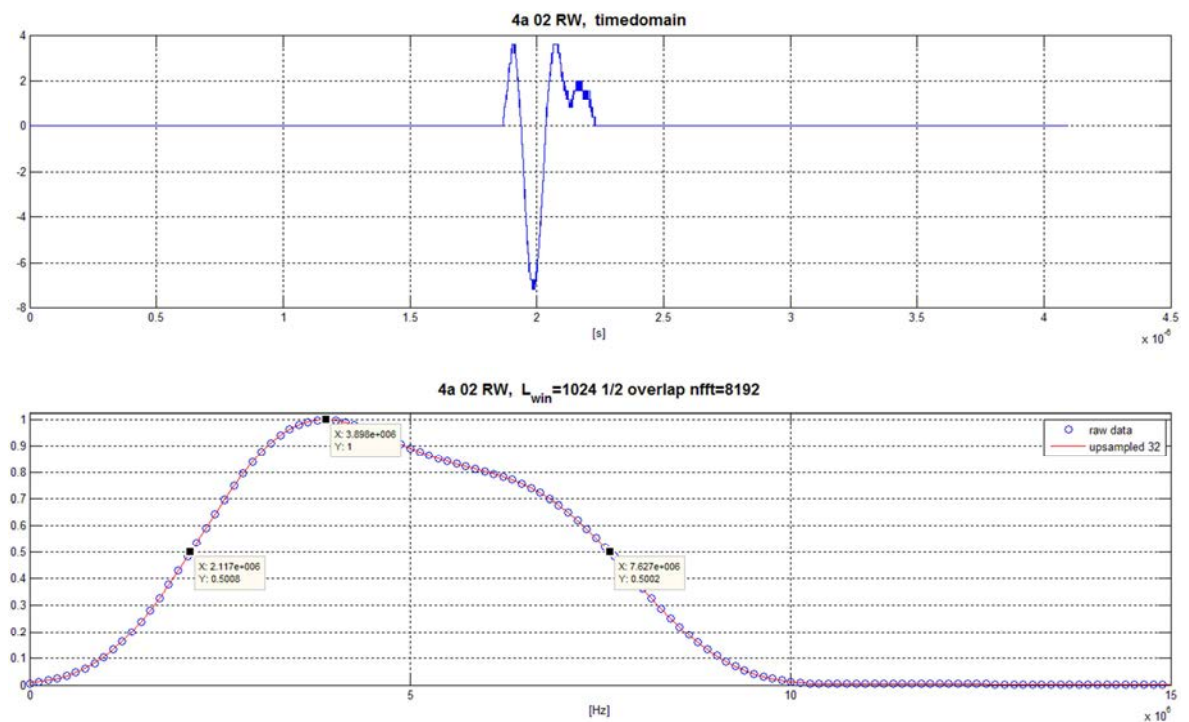


Bild 112: Zeit- und Spektraldarstellung des an Probenposition 4a_02 aufgenommenen RW-Pulses, Mittenfrequenz: 3.90 MHz, 3dB-Bandbreite 5.51 MHz

Beim Vergleich des RW- mit dem ET-Spektrum an Positioan 4a_02 fällt ein Abfallen der Mittenfrequenz auf 3,90 MHz auf. Es sind dennoch deutlich Spektralkomponenten höherer Frequenz vorhanden („Buckel bei ca. 7 MHz im Spektralbild),

deren mögliche Ursache auch im A-Bild (rot markierte Schwebung) zu finden sein könnte.

3.3.5 Ergebnis/ Diskussion

Die Spektraluntersuchungen an der Probe 4a lassen darauf schließen, dass es mittels Ultraschall möglich ist, Einflüsse der Porosität auf die Ausbreitung des Ultraschalls genauer zu analysieren.

Nach der Visualisierung des XCT- Datensatzes der Probe 4a wurde festgestellt, dass die Porosität eher in Form langgestreckter, den Rovings folgenden Schlauchporen vorliegt. Deren Morphologie ähnelt eher klassischen Zylinderbohrungen als feinen, statistisch verteilten sphärischen Einschlüssen.

Im Hinblick auf die Spektralanalyse bedeutet dies, dass der Effekt der Schwächung (Absorption + Streuung) an solch großen Reflektoren kaum messbar ist, da die Streuung beispielsweise merklich ab einem Verhältnis von Teilchengröße zu halber Wellenlänge zum Tragen kommt. Angewandt auf einen monochromatischen Puls mit 10MHz in CFK mit einer Schallgeschwindigkeit von 3000m/s ergibt sich durch die Beziehung

$$\text{Schallgeschwindigkeit } c = \lambda * f$$

Eine Wellenlänge von 0,6mm. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass Streuung an Poren in CFK bei monochromatischen 10 MHz bei einer Porengröße $< \frac{0,6\text{mm}}{2}$ zu erwarten wäre.

Zur weiteren Untersuchung und zur zum Ziel gesetzten Quantifizierung der Porosität durch US-Messgrößen müssen zukünftig auch Proben einer Signalanalyse unterzogen werden, welche eher sphärische und statistisch verteilte Poren aufweisen.

4 Wissenschaftliche Verwertung und Publikationen im Rahmen des Projektes

4.1 Bachelorarbeiten und weiterführende Projekte

Im Rahmen dieses innovativen Projektes wurden 3 Bachelor-/Diplomarbeiten, eine Studienarbeit und eine Masterarbeit angefertigt.

Zusätzlich bilden die Ergebnisse die Ausgangsbasis für eine Promotion durch einen Absolventen der Hochschule Aalen. Die Promotion mit dem Thema „Quantifizierung der Porosität in Kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen CFK mittels Ultraschall“ findet im Rahmen einer Kooperation der Hochschule Aalen und der TU Berlin statt. Die Betreuung übernimmt die Hochschule Aalen, Herr Fartely ist mit diesem Thema als Doktorand der TU Berlin angenommen. Vom Projektpartner Areva wird die Promotion durch ein Stipendium sowie die Nutzungsmöglichkeit von Ultraschallprüfsystemen unterstützt.

Darüberhinaus bilden die Ergebnisse dieses Innovativen Projektes eine Grundlage für das beantragte und genehmigte Forschungsprojekt „Zentrum für Angewandte Forschung an Hochschulen ZAFH „*SPANTEC light*“ mit dem Thema „Zer-spanungstechnologie Leichtbauwerkstoffe - Verständnis der quantitativen Zusammenhänge zwischen Werkstoff- und Anwendungseigenschaften“.

Publikationen im Rahmen des Projektes

1. S.Schuster, A.Ockert, M.Reuber, K.Pfeffer, S.Schuhmacher, HTW Aalen, M.Keigler, C.F.Maier Europlast GmbH Königsbronn "Porosity Characterisation in Carbon-Composites by X-Ray-Computed Tomography and Image Analysis and Validation by Materialographic Targeted Micro-section": 3D Microstructure Meeting Nov 2011 Saarbrücken Berichtsband ISBN: 978-3-88355-388-7 S 28-29
2. A.Ockert, K.Pfeffer, A.Schmidt, S.Schuhmacher HTW Aalen, M. Keigler C.F. Maier Europlast GmbH Königsbronn, R. Meier Areva/IntelligeNDT Systems & Services GmbH Erlangen, „Quantitative Bestimmung von Porositätskenngrößen mittels Röntgencomputertomographie und 3-D-Bildanalyse an kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen für die Automobil- und Flugzeugindustrie“, Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung DGZFP, Bremen 30.Mai-1.Juni 2011; DGZFP-Berichtsband BB 127-CD ISBN 978-3-940283-33-7 P86
3. S.Schuhmacher: „Bedeutung von CFK für die Flugzeug- und Automobilindustrie“ IWO-Jahrestagung Nov 2010 Aalen
4. C. Fartely, S. Schuhmacher HTW Aalen, R. Meier IntelligeNDT Systems & Services GmbH Erlangen, G. Radu, R. Löffler, T. Bernthaler, HTW Aalen: „Charakterisierung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen mittels Röntgencomputertomographie als Grundlage für die Entwicklung von Ultraschallprüfverfahren“, Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung DGZFP, Mai 2010 in Erfurt

4.2 Posterbeitrag mit Kurzvortrag auf der Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZFP) 2010 in Erfurt sowie Posterbeitrag auf der Fachtagung „Industrielle Röntgencomputertomografie“ 2010 in Wels/Österreich



Hochschule Aalen
Oberflächen- und Werkstofftechnik

**intelligeNDT
Systems & Services**



AREVA

Charakterisierung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen mittels Röntgencomputertomographie als Grundlage für die Entwicklung von Ultraschallprüfverfahren

Christian Fartely^{1,2}, Silvia Schuhmacher², Rainer Meier¹, Georgeta Radu², Ralf Löffler², Timo Bernthaler²

¹intelligeNDT Systems & Services GmbH, Paul – Gossen – Straße 100, 91052 Erlangen

² Hochschule Aalen – Technik und Wirtschaft, Studiengang Oberflächen- und Werkstofftechnik, Beethovenstraße 1, 73430 Aalen

I) Einführung

Stetig steigende Anforderungen an die Energieeffizienz sind der Grund für den unaufhaltsamen Vormarsch der Faserverbundkunststoffe, wobei insbesondere der Einsatz kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe (CFK) ansteigt. Zur Qualitätskontrolle von CFK-Bauteilen in der Fertigung wird hauptsächlich die Ultraschallprüfung eingesetzt. Umfangreiche Prüferfahrungen belegen, dass sie sich zur Detektion von Delaminationen, Materialeinschlüssen und Porositäten eignet.

Die Ultraschallsignale werden dabei sowohl vom Schichtaufbau des Laminats als auch von der Verteilung von Einschlüssen und Porositäten innerhalb der Schichten bzw. des Materials beeinflusst. Zur Verfeinerung der Ultraschall-Prüfaussage sind detaillierte Kenntnisse bezüglich dieser Kenngrößen erforderlich. Als Untersuchungs- bzw. Referenzmethode bietet sich hierzu die Röntgencomputertomographie (CT) an.

Die CT-Untersuchungen wurden an zwei verschiedenen CFK-Typen durchgeführt. Hinsichtlich Porosität wurden die Proben mit einer Mikrofokus-Röntgenröhre untersucht, wobei die Probendimensionen so gewählt wurden, dass eine Ultraschallprüfung derselben Proben möglich ist. Bezüglich des mikrostrukturellen Aufbaus wurde eine hochauflösende Nanofokus-Röntgenröhre verwendet.

II) Experimentelles Setup

II a) Hardware und Software

→ Röntgencomputertomograph phoenix|x-ray[®] v|tome|x s mit zwei Röntgenröhren
→ 3D-Analys-Software Volume Graphics[®] VG StudioMAX 2.0

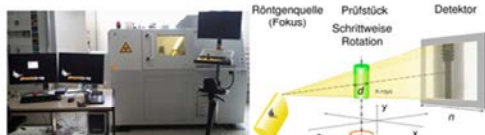


Abb. 1 : Röntgencomputertomograph der Hochschule Aalen (rechts) mit Rekonstruktionseinheit (links)

Abb. 2 : Prinzipieller Aufbau eines CT-Systems nach dem Prinzip der Kegelstrahlentomographie.

II b) Proben

Die Proben wurden vor den CT-Messungen mittels Ultraschall untersucht. Hierbei wurden beim CFK mit bidirektionaler Faserorientierung (im Folgenden BD-CFK genannt) Bereiche detektiert, die eine Abschwächung des Rückwandechos um -6, -12 und -18 dB aufgewiesen haben, dargestellt in Abb. 3). Beim CFK mit multidirektionaler Faserorientierung (MD-CFK), dargestellt in Abb. 4) traten sogar Bereiche auf, in denen das Signal der Rückwand nicht mehr zu detektieren war.

Probe	Faserorientierung	Schichtdicke Rovings / Fasern [µm]	Schichtdicke Matrix [µm]	Faserdurchmesser [µm]
BD-CFK	bidirektional	150...170 *	-	8,0 *
MD-CFK	multidirektional	200...250 *	30...50 *	5,1...5,7 *

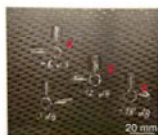


Abb. 3: BD-CFK mit Angaben zu lokal gemessenen Schallschwächungen des Rückwandechos (x = -6dB, y = -12dB, z = -18dB).



Abb. 4: MD-CFK (partiell war hier kein Rückwandecho zu detektieren).

* Sämtliche Werte aus den CT-Messungen wurden durch Untersuchungen an materialographischen Schläfen bestätigt. Hierbei kam ein Carl Zeiss[®] Axioplan 2 und die Software Axiavision 4.7 desselben Herstellers zum Einsatz.

III) Mikrofokus-CT: Darstellung der Porosität

III a) BD-CFK

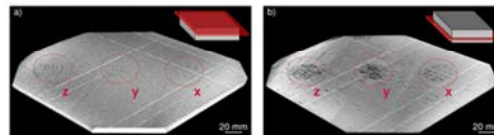


Abb. 5: CT-Aufnahme, 3D-Ansicht: a) Gesamtaufnahme

b) Schnitt ca. 4,8 mm unter Oberfläche. In den Bereichen x, y und z wurden drei Porenester (siehe Abb. 3) nachgewiesen.

III b) MD-CFK

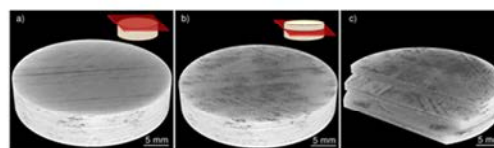


Abb. 6: CT-Aufnahme, 3D-Ansicht: a) Gesamtaufnahme

b) Schnitt ca. 1,5 mm unter der Oberfläche. Die dunklen Bereiche stellen Poren dar.

c) Schnitt quer und längs zur Faserorientierung. Die dunklen Bereiche stellen Poren dar.

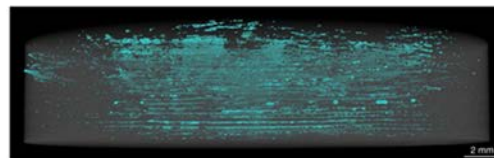


Abb. 7: CT-Aufnahme, 3D-Ansicht der Porenverteilung (türkis) im MD-CFK (Matrix und Fasern transparent). Die Poren treten ausschließlich in den etwa 30 bis 50 µm starken Matrixschichten auf.

IV) Nanofokus-CT: Visualisierung der Fasern

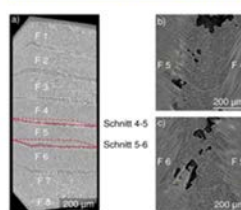


Abb. 8: CT-Aufnahme: a) 3D-Ansicht des MD-CFK. Einzelne Faserschichten F 1 bis F 8 (Dicke 200 bis 250 µm) und dazwischen liegende Matrixschichten (Dicke 30 bis 50 µm) zu erkennen.

b) Schnitt 4-5 aus Abb. 8 a), zu erkennen: einzelne Fasern der Schicht F 5 (links) und F 4 (rechts), sowie schwarze Poren in Matrixschicht (Mitte).

c) Schnitt 5-6 aus Abb. 8 a), zu erkennen: einzelne Fasern der Schicht F 6 (links) und F 5 (rechts), sowie mittig: schwarze Poren in Matrixschicht.

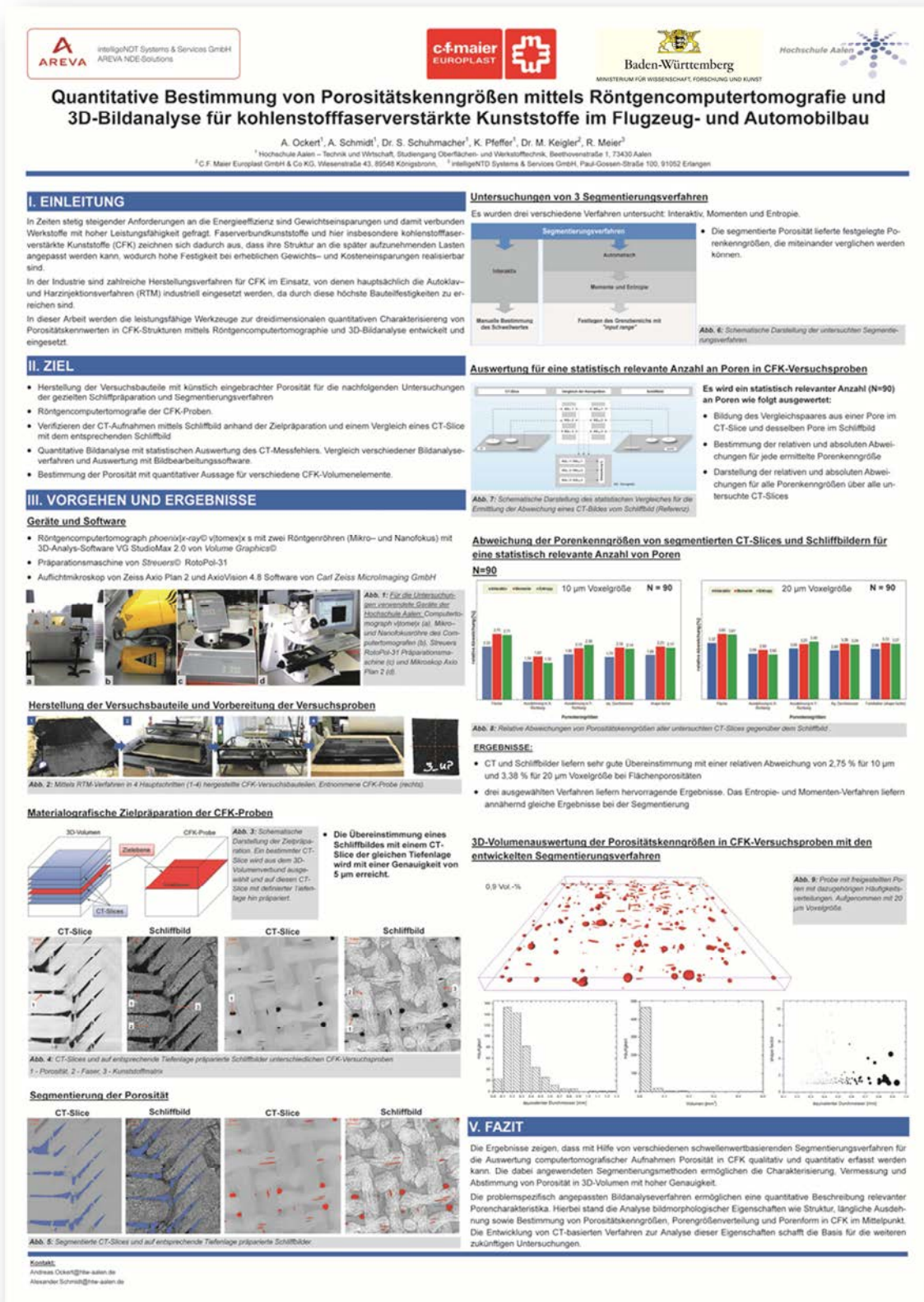
V) Fazit

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Computertomographie zur Charakterisierung von CFK eignet. So ermöglicht die Mikrofokus-CT den Nachweis von Poren und deren Volumenverteilung in CFK Proben, deren Abmessungen im Zentimeterbereich liegen und daher eine gleichzeitige Ultraschallprüfung zulassen. Die Charakterisierung der CFK-Struktur bis hin zur Darstellung einzelner Fasern, deren Durchmesser zwischen 5 µm und 8 µm lagen, wurde mit einer hochauflösenden Nanofokus-CT an Proben mit Abmessungen im Millimeterbereich durchgeführt.

Kontakt: Christian.Fartely@intelligeNDT.de

Die computertomographischen Untersuchungen sind während meiner Abschlussarbeit an der Hochschule Aalen entstanden. Besonderer Dank gebührt der intelligeNDT Systems & Services GmbH für die Unterstützung dieser Arbeit.

4.3 Posterbeitrag mit Kurzvortrag auf der Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZFP) 2011 in Bremen



4.4 Foliensatz des Vortrages auf dem 3D Microstructure Meeting, 2011 in Saarbrücken

Hochschule Aalen

Porosity Characterisation in Carbon Composites by X-Ray Computed Tomography and Image Analysis and Validation by Materialografic Targeted Microsection

Hochschule Aalen

Sara Schuster
B. Eng. A. Ockert
Markus Reuber
Dipl. Ing. K. Pfeffer
Prof. Dr. S. Schuhmacher



Dr. M. Keigler



Supported by the State of Baden-Württemberg within the context of the project "Innovative Projektkooperationsprojekte"

02.11.2011 3D Microstructure Meeting Saarbrücken Sara Schuster 1

Hochschule Aalen

Advantages of Carbon Fibre Reinforced Plastics (CFRP)

- Very high mechanical strength
- 50 % weight reduction compared to steel, 30 % compared to Al
- High modulus of elasticity
- Resistance to corrosion
- Very good fatigue strength

Present disadvantages

- High production costs
- Long production time



02.11.2011 3D Microstructure Meeting Saarbrücken Sara Schuster 2

Hochschule Aalen

Development aims in industry

- Reduce production costs
- Reduce production time
- Realize mass production
 - Developing the Resin Transfer Moulding (RTM) technology
 - Porosity formation is immanent in the manufacturing process
- Rule of thumb: 1% porosity decreases mechanical strength by 10%

02.11.2011 3D Microstructure Meeting Saarbrücken Sara Schuster 3

Hochschule Aalen

Reasons for research

- Porosity decreases mechanical strength
- Distribution, size and shape of pores influences strength
- Necessity is the evaluation of these pore parameters

02.11.2011 3D Microstructure Meeting Saarbrücken Sara Schuster 4

Hochschule Aalen

Purpose of the research

Mikro-CT and 3-D-Image-Analysis is a tool for



Development of Non-Destructive Testing (NDT) –Methods
- Ultrasound
- Thermography

Strength tests

02.11.2011 3D Microstructure Meeting Saarbrücken Sara Schuster 5

Hochschule Aalen

X-ray computed tomography



Parameter	Micro focus	Nano focus
Resolution	20 µm	10 µm
Current	240 kV	180 kV

Phoenix v|tome|x s

- Digital detector: 2000 x 1500 Pixel, Pixel size ca. 124 µm
- Detail perceptibility: < 1 µm (Nano focus tube)
- Software used for analysis: Volume Graphics VGStudio MAX 2.0

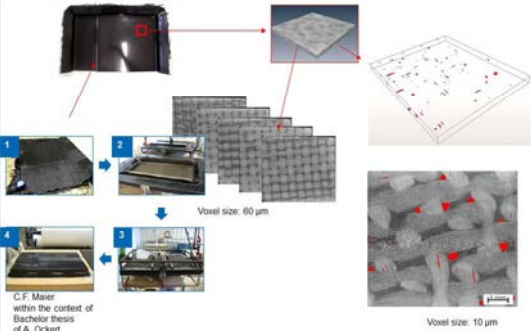
02.11.2011 3D Microstructure Meeting Saarbrücken Sara Schuster 6

Hochschule Aalen

Samples Preparation and Computed Tomography Measurements

02.11.2011 3D Microstructure Meeting Saarbrücken Sara Schuster 7

Hochschule Aalen



C.F. Master within the context of Bachelor thesis of A. Ockert

Voxel size: 60 µm

Voxel size: 10 µm

02.11.2011 3D Microstructure Meeting Saarbrücken Sara Schuster 8

Hochschule Aalen

- **Problem 1- Verification and Validation of volume porosity up to now only by chemical analysis**
 - No statement possible regarding the size distribution, orientation and shape of pores
- **Problem 2 - Calibration**
 - define threshold value

02.11.2011 3D Microstructure Meeting Saarbrücken Sara Schuster 9

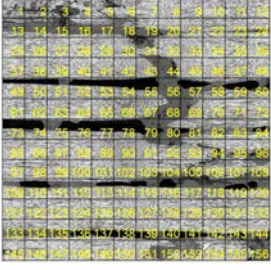
Hochschule Aalen

Targeted Microsection and Light Microscopy for Verification and Calibration

02.11.2011 3D Microstructure Meeting Saarbrücken Sara Schuster 10

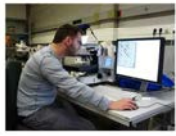
Hochschule Aalen

Light microscope – image acquisition



Mosaic-Image

- Take single images
- Overlap of images of 10 %
- Stitch images together
- Creating one image with 50x magnification



02.11.2011 3D Microstructure Meeting Saarbrücken Sara Schuster 11

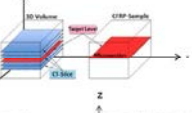
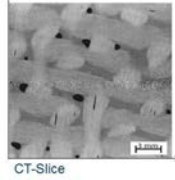
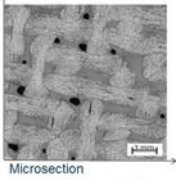
Hochschule Aalen

Comparison of CT-Slice and Microsection

02.11.2011 3D Microstructure Meeting Saarbrücken Sara Schuster 12

Hochschule Aalen

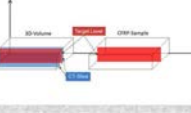
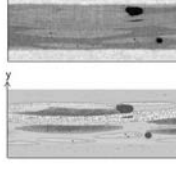
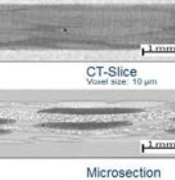
Comparison of CT-Slice and Microsection xz-plane

02.11.2011 3D Microstructure Meeting Saarbrücken Sara Schuster 13

Hochschule Aalen

Comparison of CT-Slice and Microsection xy-plane

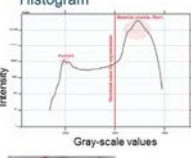




02.11.2011 3D Microstructure Meeting Saarbrücken Sara Schuster 14

Hochschule Aalen

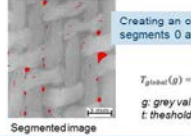
Segmentation with interactive global threshold value method

Histogram



- graphic representation of grey-scale values in one image

Segmented image

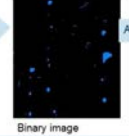


Creating an output image with segments 0 and 1

$$T_{global}(g) = \begin{cases} 0 & \text{if } g < t \\ 1 & \text{if } g \geq t \end{cases}$$

g : gray value
 t : threshold value

Binary image



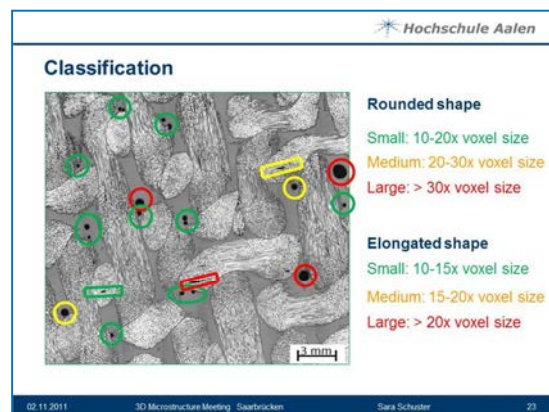
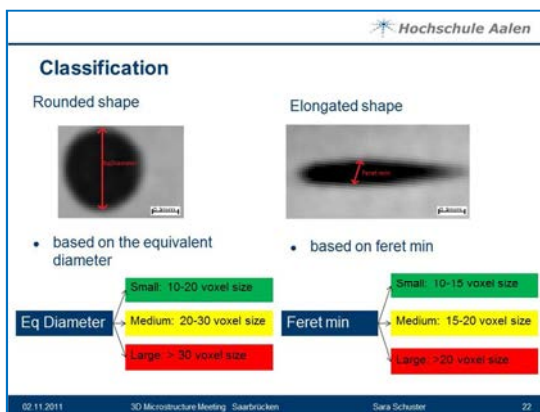
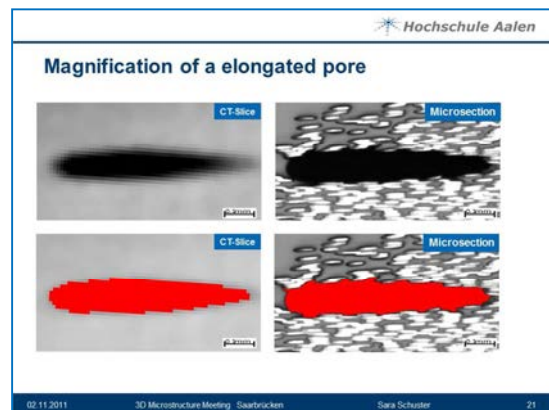
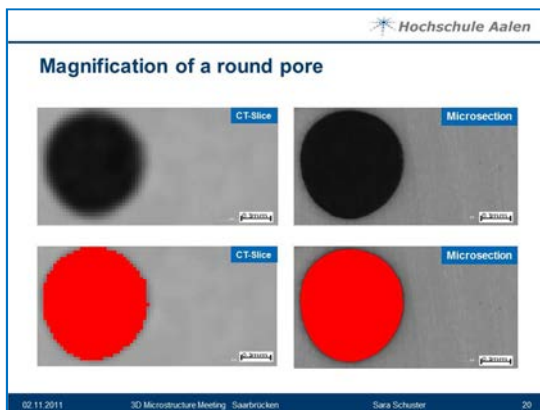
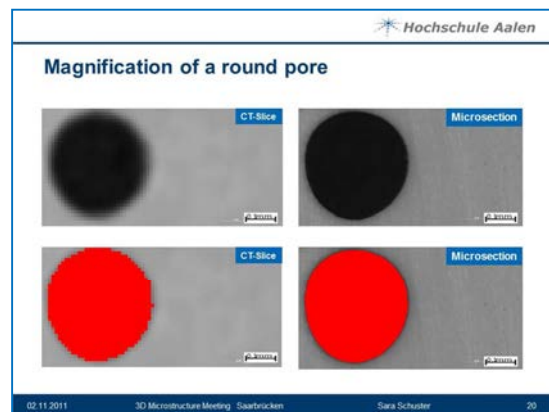
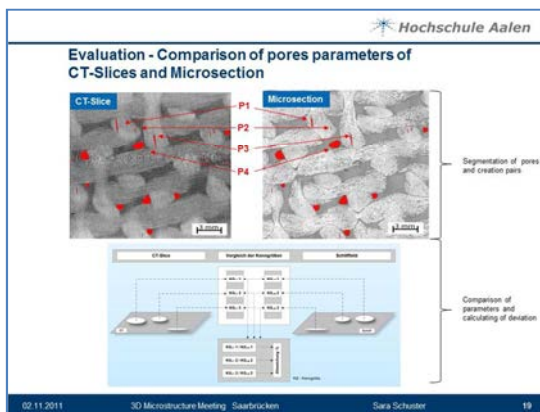
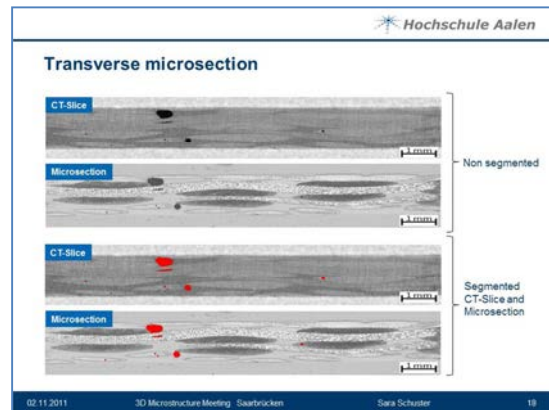
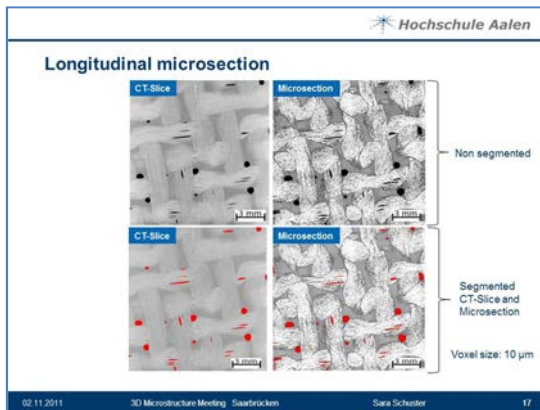
Analysis

02.11.2011 3D Microstructure Meeting Saarbrücken Sara Schuster 15

Hochschule Aalen

Calibration by Comparison of segmented CT-Slices with Microsection (2D)

02.11.2011 3D Microstructure Meeting Saarbrücken Sara Schuster 16



Hochschule Aalen

Research results

02.11.20113D Microstructure Meeting SaarbrückenSara Schuster24

Hochschule Aalen

Average deviation of rounded shape

Large: > 30x voxel size
N = 20 pores

$$f_0 = \frac{1}{\frac{feret_{min}}{feret_{max}}}$$
$$f_1 = \frac{1}{\frac{4\pi A}{S^2}}$$

A: Area
S: Perimeter

Metric	Value [%]
Area [%]	6.2
EqDiameter [%]	3.5
f0 [%]	5.0
f1 [%]	4.1

02.11.20113D Microstructure Meeting SaarbrückenSara Schuster25

Hochschule Aalen

Average deviation of rounded shape

Medium: 20-30x voxel size
N = 20 pores

Metric	Value [%]
Area [%]	8.6
EqDiameter [%]	4.8
f0 [%]	5.9
f1 [%]	6.9

02.11.20113D Microstructure Meeting SaarbrückenSara Schuster26

Hochschule Aalen

Average deviation of rounded shape

Small: 10-20x voxel size
N = 20 pores

Metric	Value [%]
Area [%]	10.9
EqDiameter [%]	5.7
f0 [%]	6.7
f1 [%]	8.4

02.11.20113D Microstructure Meeting SaarbrückenSara Schuster27

Hochschule Aalen

Average deviation of rounded shape

Evaluation > 10 x voxel size of EqDiameter
N = 20 pores each class

Class	Area [%]	EqDiameter [%]	f0 [%]	f1 [%]
Small 10-20x Voxelgröße	10.9	5.7	6.7	8.4
Medium 20-30x Voxelgröße	8.6	4.8	5.9	6.9
Large >30x Voxelgröße	6.2	3.5	5.0	4.1

02.11.20113D Microstructure Meeting SaarbrückenSara Schuster28

Hochschule Aalen

Average deviation of rounded shape

Evaluation > 10 x voxel size of EqDiameter
N = 20 pores each class

Class	Area [%]	EqDiameter [%]	f0 [%]	f1 [%]
Small 10-20x Voxelgröße	10.9	5.7	6.7	8.4
Medium 20-30x Voxelgröße	8.6	4.8	5.9	6.9
Large >30x Voxelgröße	6.2	3.5	5.0	4.1

02.11.20113D Microstructure Meeting SaarbrückenSara Schuster28

Hochschule Aalen

Average deviation of rounded shape

Evaluation > 10 x voxel size of EqDiameter
N = 20 pores each class

Class	Area [%]	EqDiameter [%]	f0 [%]	f1 [%]
Small 10-20x Voxelgröße	10.9	5.7	6.7	8.4
Medium 20-30x Voxelgröße	8.6	4.8	5.9	6.9
Large >30x Voxelgröße	6.2	3.5	5.0	4.1

02.11.20113D Microstructure Meeting SaarbrückenSara Schuster29

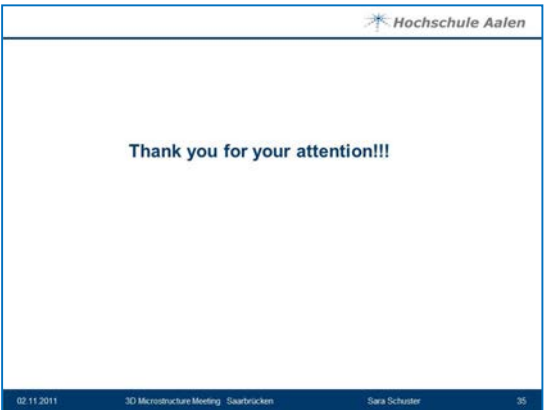
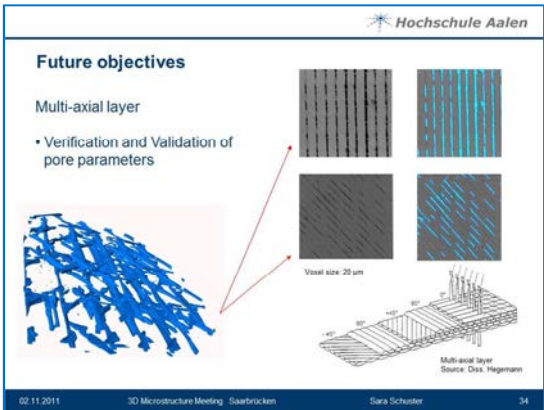
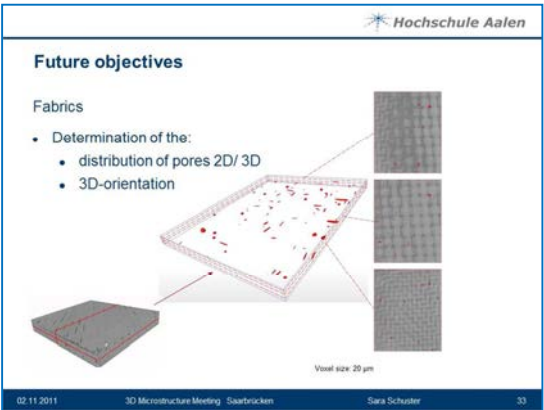
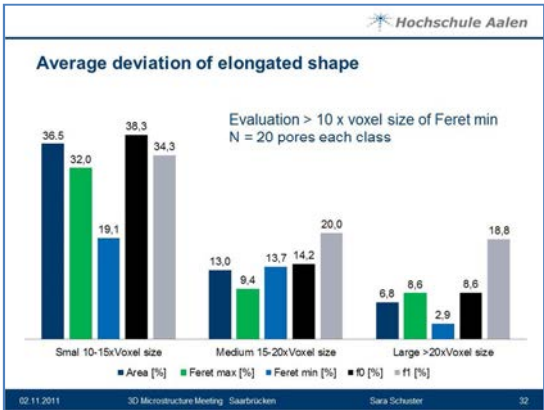
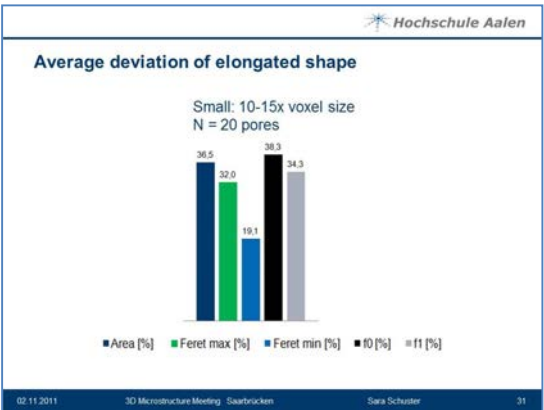
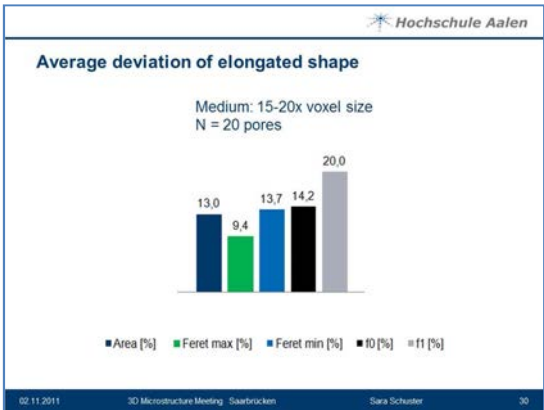
Hochschule Aalen

Average deviation of elongated shape

Large: > 20x voxel size
N = 20 pores

Metric	Value [%]
Area [%]	6.8
Feret max [%]	8.6
Feret min [%]	2.9
f0 [%]	8.6
f1 [%]	18.8

02.11.20113D Microstructure Meeting SaarbrückenSara Schuster29



5 Anhang

		Segment								
		1,1	1,2	1,3	2,1	2,2	2,3	3,1	3,2	3,3
Volumen	mm ³	139,62	140,09	139,62	139,62	140,09	139,62	139,62	140,09	139,62
Poren 3D	mm ³	3,11	2,26	2,49	2,12	4,87	2,31	2,63	3,74	2,44
V-Porosität	%	2,22	1,61	1,78	1,52	3,47	1,65	1,88	2,67	1,75
Fläche XZ	mm ²	35,68	35,80	35,68	35,68	35,80	35,68	35,68	35,80	35,68
Poren XZ	mm ²	14,19	10,48	12,34	17,30	18,93	11,05	13,10	15,75	14,55
F-Porosität	%	39,77	29,29	34,58	48,49	52,87	30,99	36,72	44,00	40,79
Rückwand(RW)										
f mitte	[MHz]	4,395	3,547	3,478	3,544	4,642	3,482	4,115	3,806	4,528
3dB Bandbreite	[MHz]	2,479	2,133	1,984	2,338	2,647	2,124	2,522	2,331	2,47
Amplitude	[V]	0,8	2,56	1,36	1,36	0,96	2,8	1,44	1,2	1,52
Eintritt(ET)										
f mitte	[MHz]	4,043	4,058	4,081	4,058	4,036	4,066	4,02	4,028	3,962
3dB Bandbreite	[MHz]	2,525	2,354	2,372	2,358	2,453	2,315	2,254	2,368	2,479
Amplitude	[V]	4,24	4,08	4,32	4,08	3,92	4	2,08	2,24	2,32
Δ f mitte (RW-ET)	[MHz]	0,352	-0,511	-0,603	-0,514	0,606	-0,584	0,095	-0,222	0,566
Δ BB 3dB (RW-ET)	[MHz]	-0,046	-0,221	-0,388	-0,02	0,194	-0,191	0,268	-0,037	-0,009
V. f mitte (RW/ET)	skalar	1,09	0,87	0,85	0,87	1,15	0,86	1,02	0,94	1,14
V. BB 3dB (RW/ET)	skalar	1,04	0,89	0,83	0,98	1,11	0,89	1,06	0,98	1,04
V. F-/V-Por.	skalar	17,88	18,19	19,38	31,98	15,22	18,73	19,50	16,49	23,37
Δ ET/RW	[dB]	14,49	4,05	10,04	9,54	12,22	3,10	3,19	5,42	3,67

Bild 113: Tabelle mit Werten aus Signalanalyse bei 5MHZ der Segmente [1-1] bis [3-3] der Probe 4a

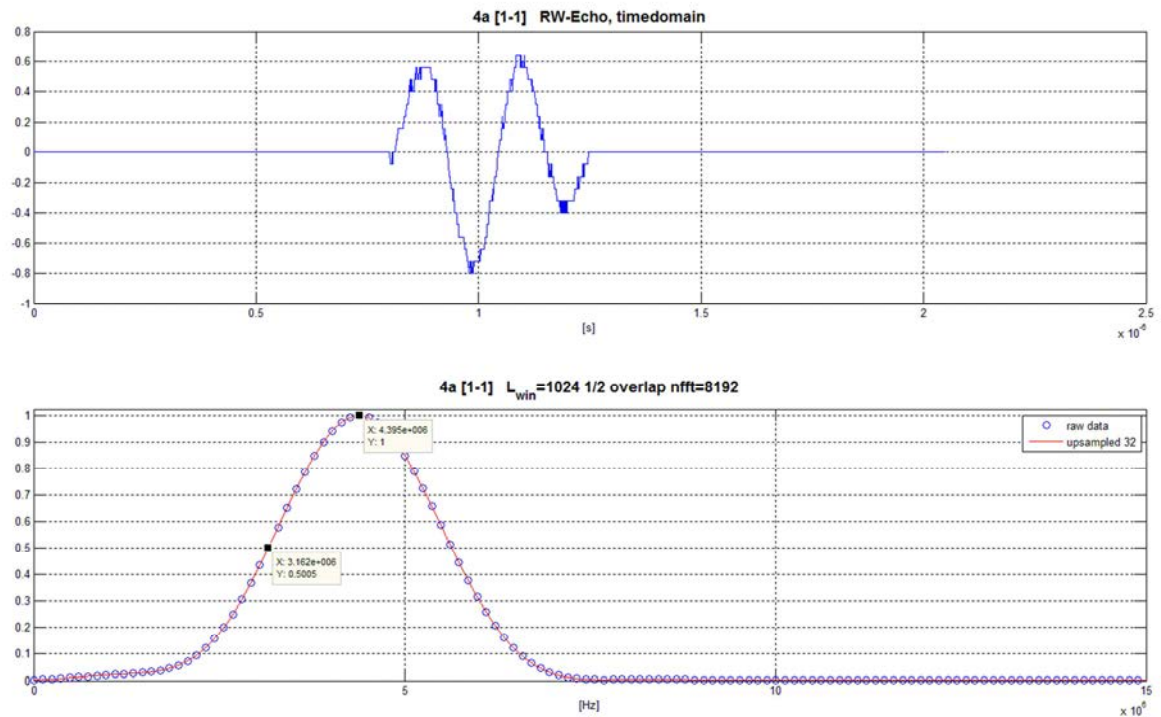


Bild 114: Zeit und Spektraldarstellung des RW-Signals vom Sektor [1-1] der Probe 4a

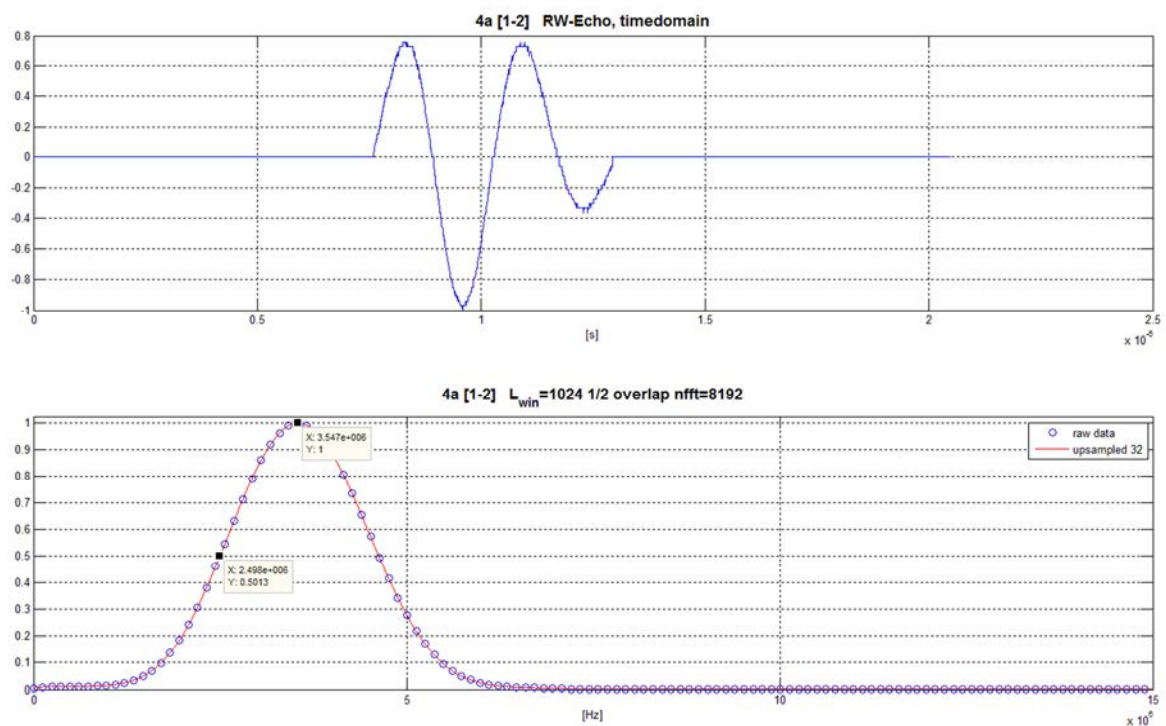


Bild 115: Zeit und Spektraldarstellung des RW-Signals vom Sektor [1-2] der Probe 4a

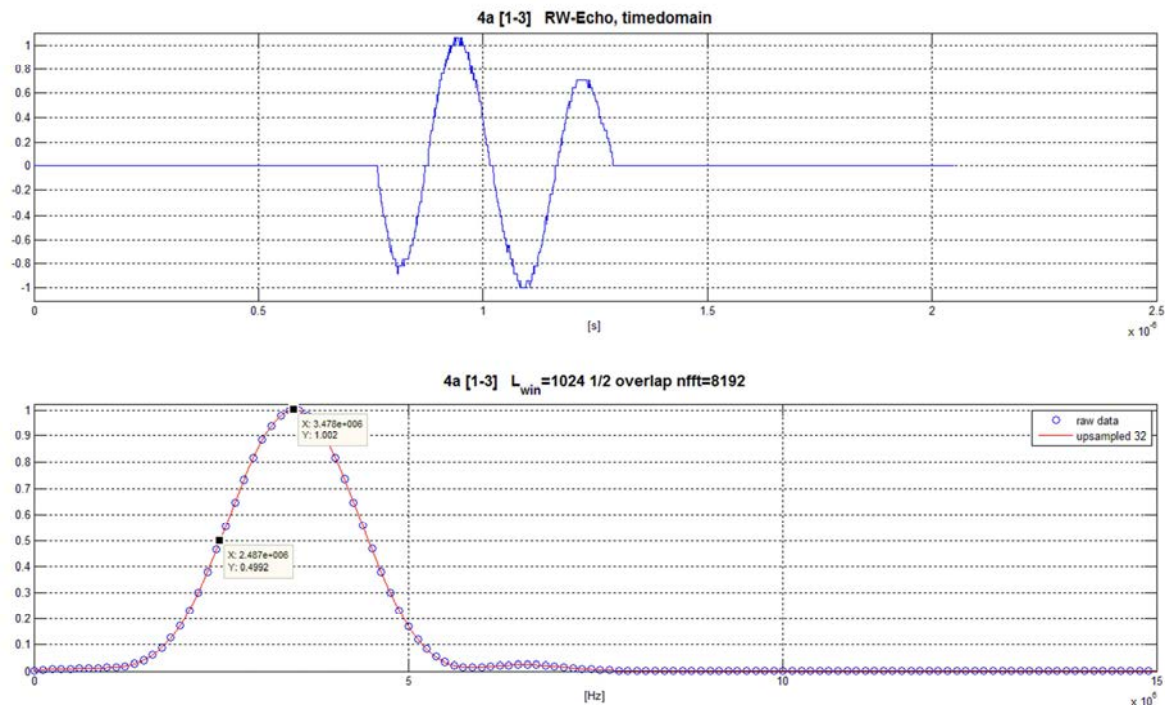


Bild 116: Zeit und Spektraldarstellung des RW-Signals vom Sektor [1-3] der Probe 4a

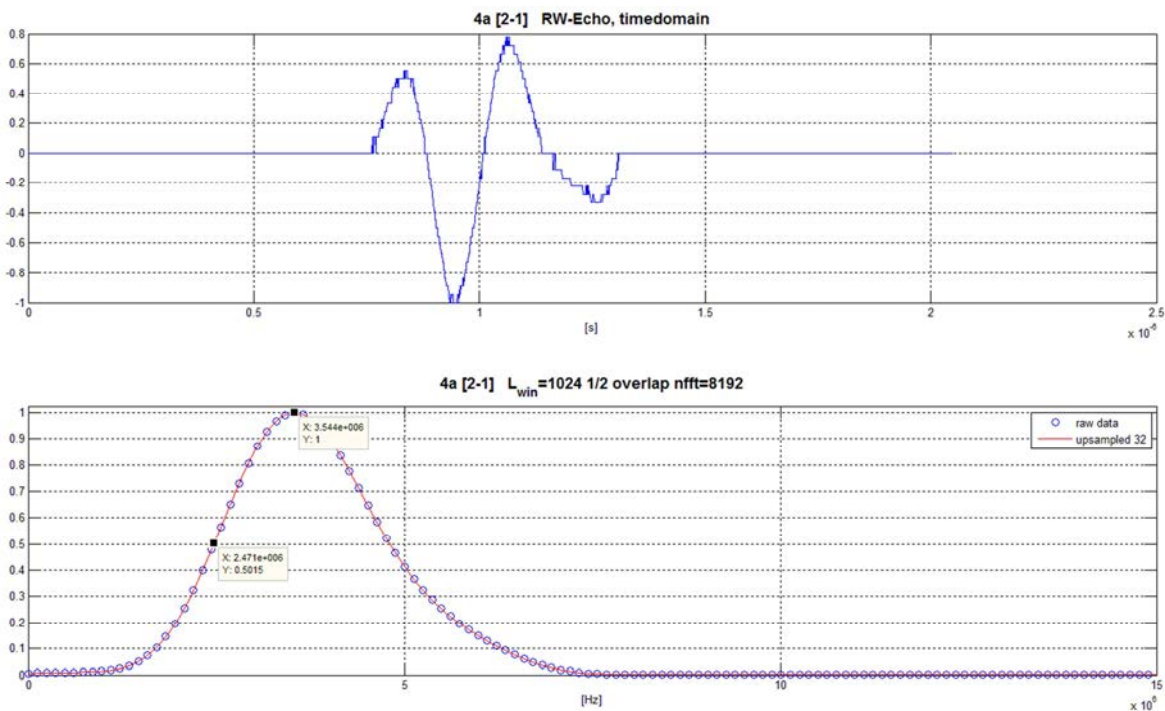


Bild 117: Zeit und Spektraldarstellung des RW-Signals vom Sektor [2-1] der Probe 4a

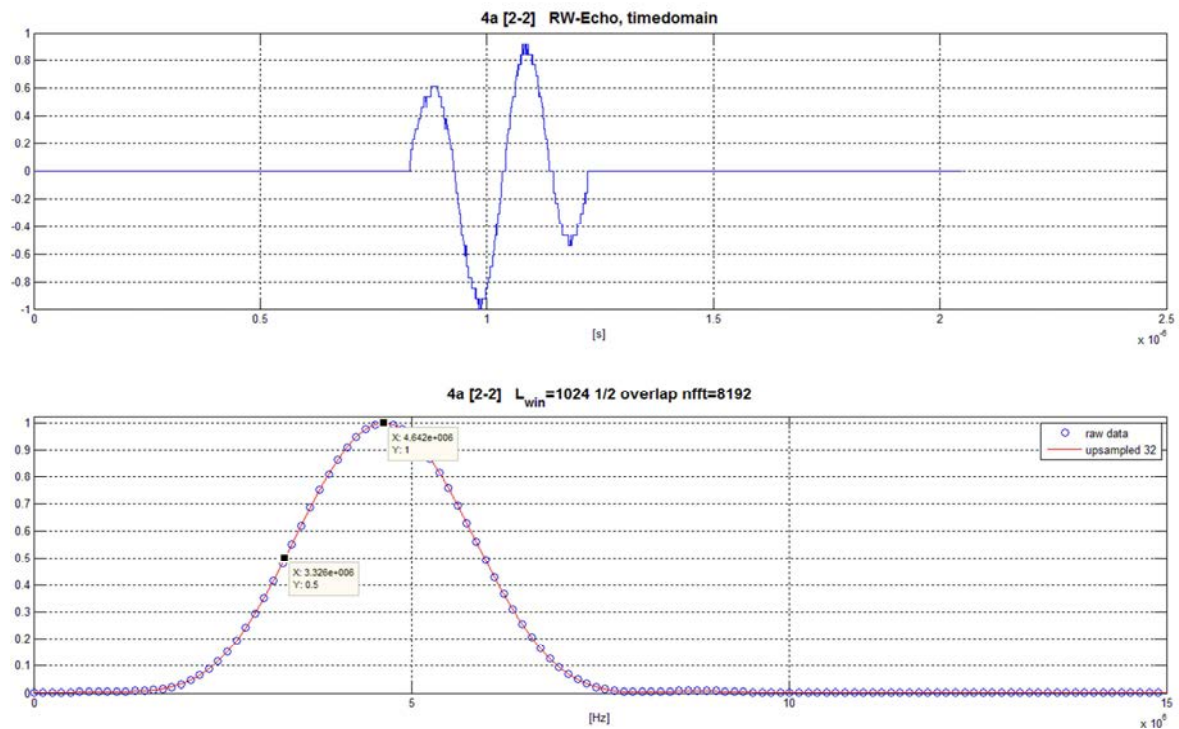


Bild 118: Zeit und Spektraldarstellung des RW-Signals vom Sektor [2-2] der Probe 4a

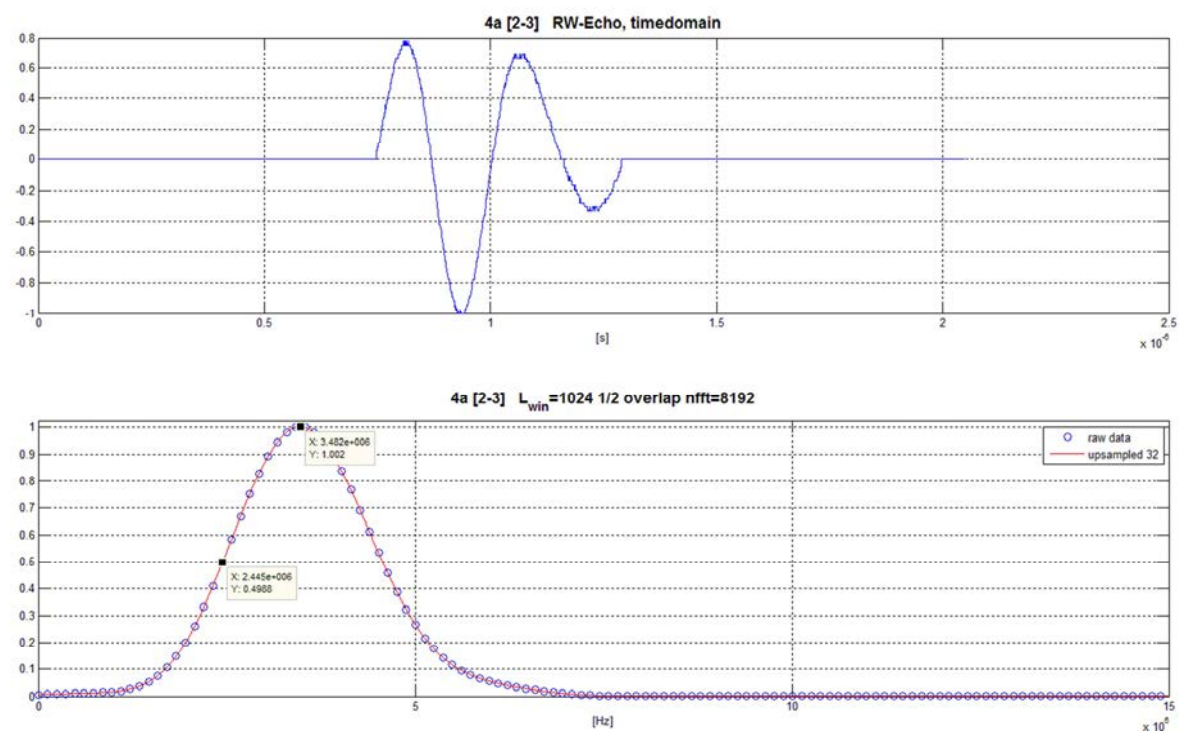


Bild 119: Zeit und Spektraldarstellung des RW-Signals vom Sektor [2-3] der Probe 4a

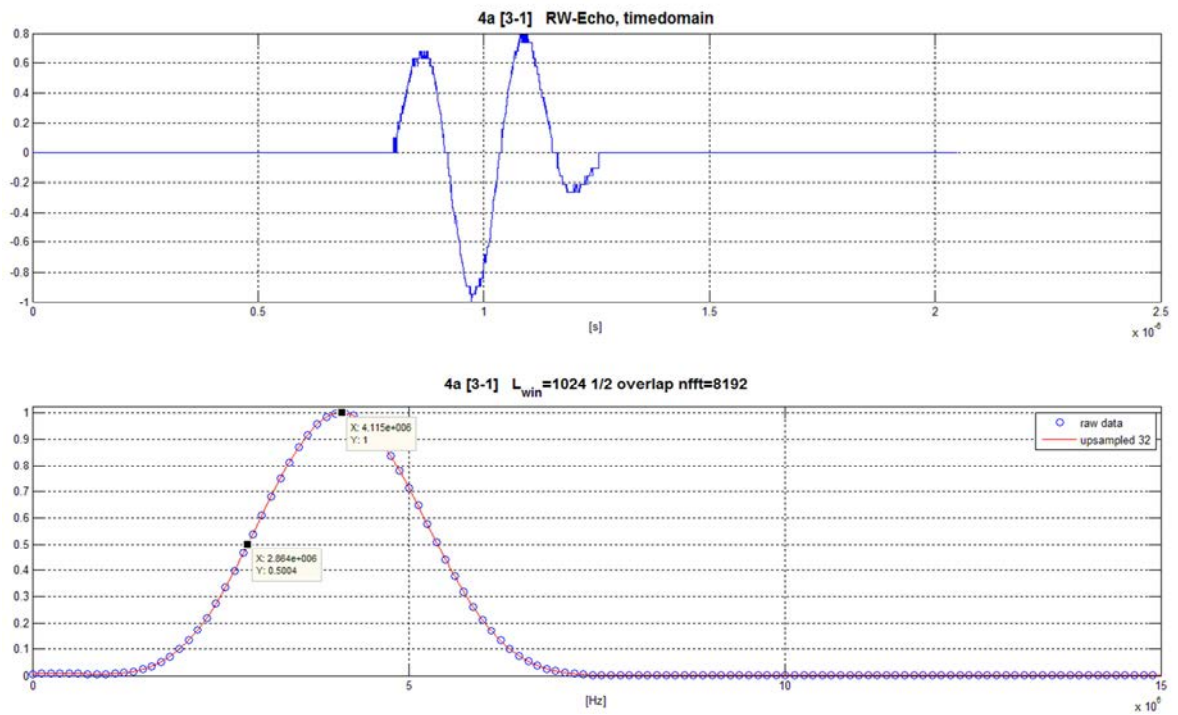


Bild 120: Zeit und Spektraldarstellung des RW-Signals vom Sektor [3-1] der Probe 4a

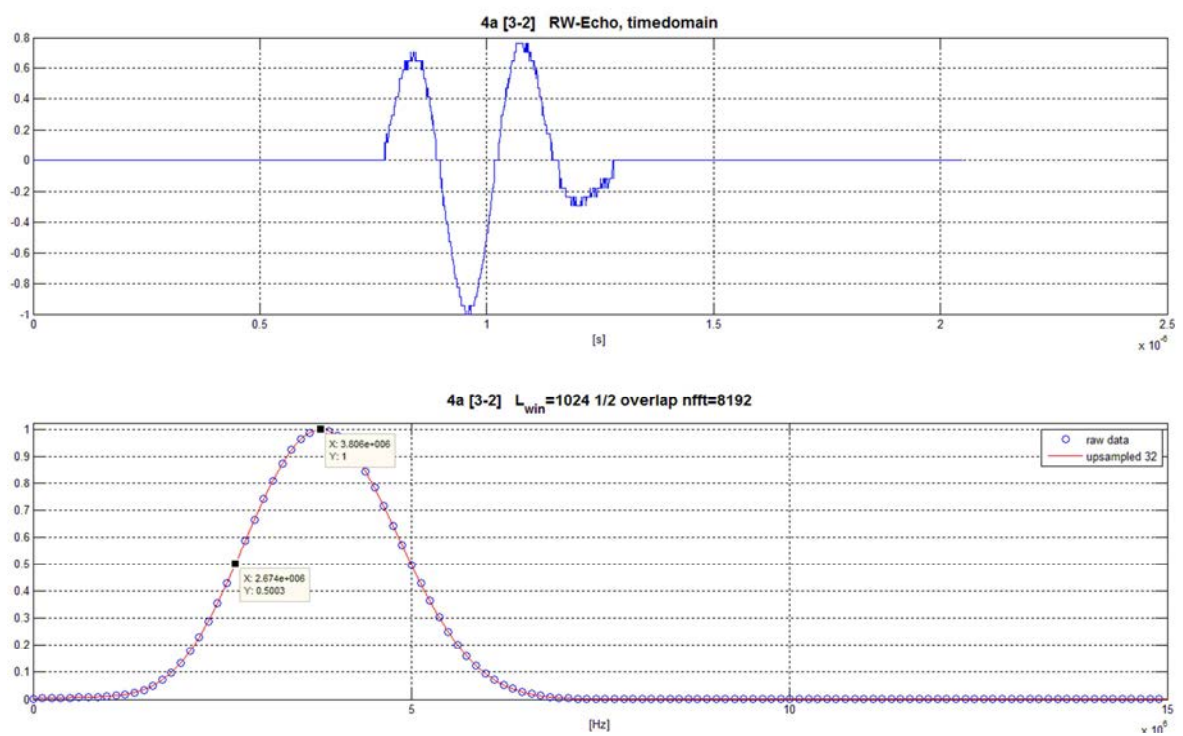


Bild 121: Zeit und Spektraldarstellung des RW-Signals vom Sektor [3-2] der Probe 4a

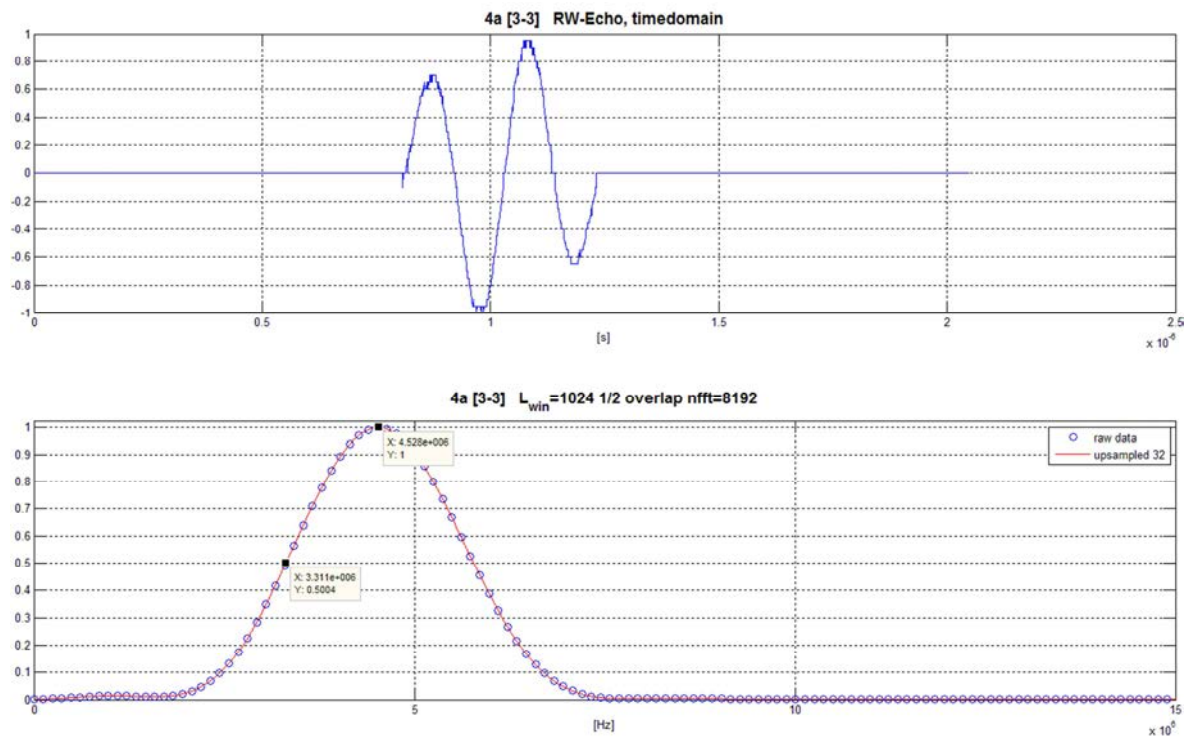


Bild 122: Zeit und Spektraldarstellung des RW-Signals vom Sektor [3-3] der Probe 4a

Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Herstellung der CFK-Versuchsbauteile bei der Firma C.F. Maier Europlast GmbH.....	9
Bild 2: Untersuchten CFK-Proben mit zwei unterschiedlichen Gewebelagen. Wandstärke blieb im Laufe der Untersuchungen konstant.	10
Bild 3: Schematische Darstellung des Aufbaus der Probe mit einem Gewebe. In den untersuchten Proben verwendeten Gewebearten (a) - Leinwand und (b) – Körperbindung.....	10
Bild 4: Schematische Darstellung des Aufbaus der Probe mit einem Multiaxialgelege	11
Bild 5: Beschaffte CFK-Multiaxialgelege-Proben mit unterschiedlicher Anzahl der Gelegelagen und Dicke.	12
Bild 6: Röntgencomputertomograf an der Hochschule Aalen.	12
Bild 7: Darstellung des 3D-Volumens in VGStudio 2.0 mit entnommenen Slices. Aufgenommen mittels Mikrofokusröhre mit 20 µm Voxelgröße. Die Probengröße in 3D-Darstellung beträgt 30x30x2,5 mm.	13
Bild 8: Verschiedene Ansichten eines 3D-Volumens. Aufgenommen mittels Mikrofokusröhre mit 20 µm Voxelgröße. Die Probengröße in 3D-Darstellung beträgt 30x30x2,5 mm. .	14
Bild 9: Frei ausgewählte CT-Slices von unterschiedlichen CFK-Proben. Aufgenommen mit Mikro-fokusröhre, 20 µm Voxelgröße. Links: Ca. 100 µm unter der Oberfläche liegender CT-Slice. Rechts: Ca. 120 µm unter der Oberfläche liegender CT-Slice. ...	14
Bild 10: Schematische Darstellung des Untersuchungsablaufes bei der röntgencomputertomografischen Messungen.	15
Bild 11: Übersichtsaufnahmen der Multiaxialgelege-Probe. Aufgenommen mittels mikro-CT mit 60 µm Voxelgröße.....	16
Bild 12: Übersichtsaufnahmen eines Ausschnittes (30 mm x 30 mm) der Multiaxialgelege-Probe. Aufgenommen mittels mikro-CT mit 20 µm Voxelgröße.	17
Bild 13: Aus dem 3D-Volumen extrahierte Quer- und längsslices. Aufgenommen mit nano-CT mit 10 µm Voxelgröße.....	17
Bild 14: (a)-Schliffbild, (b)- Ein Bildausschnitt aus einem CT-Slice für den Vergleich mit Schliffbild und 20 µm Voxelgröße. Aufgenommen mittels Nanofokusröhre mit 10 µm Voxelgröße. (c)-CT-Slice für den Vergleich mit Schliffbild und 10 µm Voxelgröße. Aufgenommen mittels Mikrofokusröhre mit 20 µm Voxelgröße.....	18
Bild 15: Schematische Darstellung der Zielpreparation. Ein bestimmter CT-Slice wird aus dem 3D-Volumenverbund ausgewählt und auf diesen CT-Slice mit definierter Tiefenlage hin präpariert. (a) – Längspräparation, (b) – Querpräparation.	19
Bild 16: Auflichtmikroskop AxioPlan 2 Imaging der Firma Zeiss.....	20
Bild 17: Auf ein Schliff aufgelegter Raster in AxioVision Software.....	20
Bild 18: Zielpreparation. Ein CT-Slice und auf entsprechende Tiefenlage präparierter Schliff. Multiaxialgelege-Proben von Areva / intelligenteNTD.	21
Bild 19: Zielpreparation. Ein CT-Slice und auf entsprechende Tiefenlage präparierter Querschliff. Multiaxialgelege-Proben von Areva / intelligenteNTD.	21
Bild 20: Zielpreparation. Ein CT-Slice und auf entsprechende Tiefenlage präparierter Schliff. Gewebe-Proben von C.F. Maier Europlast.	22
Bild 21: Vorgehensweise statistischer Auswertung der Porenkenngrößen	22
Bild 22: Schematische Darstellung einer Verarbeitungskette von CT-Volumendaten.....	23
Bild 23: Erläuterung zum Aufbau eines Histogramms und zur Ermittlung eines Schwellwertes	24
Bild 24: Segmentierter und nicht segmentierter CT-Slice und das Schliffbild der gleichen Tiefenlage. Gewebe-CFK-Proben der Firma C.F. Maier Europlast.....	25
Bild 25: Segmentierter und nicht segmentierter CT-Slice und das Schliffbild der gleichen Tiefenlage. Multiaxialgelege-Proben der Firma Areva / intelligenteNTD.....	26
Bild 26: Segmentierter und nicht segmentierter CT-Slice und das Schliffbild der gleichen Tiefenlage in der Querbetrachtung. Multiaxialgelege-Proben der Firma Areva / intelligenteNTD.....	26
Bild 27: Vergrößerung einer runden segmentierten Pore des CT-Bildes, gemessen mittels Mikrofokusröhre bei 20 µm Voxelgröße. (a) segmentierte Pore, (b) segmentierte Pore mit Pixelgitter.....	28
Bild 28: Messung des Feret-Durchmessers für den Winkelbereich 0-90°	28
Bild 29: Schematische Darstellung des Vergleiches der Porenkenngrößen von CT-Slices und Schliffbildern.....	31
Bild 30: Gegenüberstellung von CT-Slice und Schliffbild. Vergrößerung einer runden Pore. 10 µm. Mikrofokusröhre. (a) CT-Slice, (b) Schliffbild, (c) segmentierter CT-Slice, (d) segmentiertes Schliffbild	32

Bild 31: Gegenüberstellung von CT-Slice und Schliffbild. Vergrößerung einer länglichen Pore. 10 µm. Mikrofokusröhre. (a) CT-Slice, (b) Schliffbild, (c) segmentierter CT-Slice, (d) segmentiertes Schliffbild	33
Bild 32: Klassifizierung für runde Poren.	33
Bild 33: Klassifizierung für längliche Poren.	34
Bild 34: Schliffbild. 50-fache Vergrößerung.....	34
Bild 35: Relative Abweichung für große runde Poren. 10 µm	35
Bild 36: Relative Abweichung für mittlere runde Poren. 10 µm.....	35
Bild 37: Relative Abweichung für kleine runde Poren. 10 µm	35
Bild 38: Relative Abweichung für große längliche Poren. 10 µm	36
Bild 39: Relative Abweichung für mittlere längliche Poren. 10 µm.....	36
Bild 40: Relative Abweichung für kleine längliche Poren. 10 µm	36
Bild 41: Relative Abweichung für kleine längliche Poren. 20 µm	37
Bild 42: Relative Abweichung für mittlere runde Poren. 20 µm.....	37
Bild 43: 3D-Darstellung der Porosität in einer Gewebe-CFK-Probe. Aufgenommen mittels Mikrofokusröhre mit 20 µm Voxelgröße. Poren sind rot dargestellt. Faser und Matrix sind ausgeblendet.	38
Bild 44: 3D-Darstellung der Porosität in einer Gelege-CFK-Probe. Aufgenommen mittels Mikrofokusröhre mit 20 µm Voxelgröße. Poren sind blau dargestellt. Matrix und Fasern sind ausgeblendet.....	38
Bild 45: Schematische Darstellung der durchgeführten Versuche.....	40
Bild 46: Schematischer Ablauf der Probenherstellung.....	41
Bild 47: Probenentnahme.....	41
Bild 48: 3D-Darstellung der Probe V1/1. Injektionsgeschwindigkeit von 1,5 kg/min. Volumenporosität: 0,13 %. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre).....	42
Bild 49: 3D-Darstellung der Probe V1/2. Injektionsgeschwindigkeit von 1,5 kg/min. Volumenporosität: 2,69 %. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre).....	43
Bild 50: 3D-Darstellung der Probe V2/1. Injektionsgeschwindigkeit von 3,4 kg/min. Volumenporosität: 0,03%. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre).....	43
Bild 51: 3D-Darstellung der Probe V2/2. Injektionsgeschwindigkeit von 3,4 kg/min. Volumenporosität: 0,21 %. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre).....	44
Bild 52: 3D-Darstellung der Probe V3/1. Injektionsgeschwindigkeit von 5,5 kg/min. Volumenporosität: 0,08 %. 60µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre).....	44
Bild 53: 3D-Darstellung der Probe V3/2. Injektionsgeschwindigkeit von 5,5 kg/min. Volumenporosität: 0,21 %. 60µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre).....	45
Bild 54: Gegenüberstellung der CT-Slices aus der Mitte der Z-Achse	46
Bild 55: 3D-Darstellung der Probe V8/1. Werkzeugtemperatur von 80°C. Volumenporosität: 0,54%. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre)	48
Bild 56: 3D-Darstellung der Probe V8/2. Werkzeugtemperatur von 80°C. Volumenporosität: 2,54%. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre)	48
Bild 57: 3D-Darstellung der Probe V2/1. Werkzeugtemperatur von 75°C. Volumenporosität: 0,03 %. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre)	48
Bild 58: 3D-Darstellung der Probe V2/2. Werkzeugtemperatur von 75°C. Volumenporosität: 0,21 %. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre)	49
Bild 59: Gegenüberstellung der CT-Slices aus der Mitte der Z-Achse	50
Bild 60: 3D-Darstellung der Probe V6/1. Druckgesteuerte Injektion mit 10 bar. Volumenporosität: 0,07%. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre).....	51
Bild 61: 3D-Darstellung der Probe V6/2. Druckgesteuerte Injektion mit 10 bar. Volumenporosität: 0,59%. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre).....	51
Bild 62: 3D-Darstellung der Probe V7/1. Druckgesteuerte Injektion mit 15 bar. Volumenporosität: 0,09%. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre).....	52
Bild 63: 3D-Darstellung der Probe V7/2. Druckgesteuerte Injektion mit 15 bar. Volumenporosität: 1,21 %. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre).....	52
Bild 64: Gegenüberstellung der CT-Slices aus der Mitte der Z-Achse	53
Bild 65: 3D-Darstellung der Probe V4/1. Injektionsgeschwindigkeit von 3,4 kg/min mit Vakuum. Volumenporosität: 0,24 %. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre).....	54
Bild 66: 3D-Darstellung der Probe V4/2. Injektionsgeschwindigkeit von 3,4 kg/min mit Vakuum. Volumenporosität: 0,73 %. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre).....	55
Bild 67: 3D-Darstellung der Probe V2/1. Injektionsgeschwindigkeit von 3,4 kg/min ohne Vakuum. Volumenporosität: 0,03%. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre).	55
Bild 68: 3D-Darstellung der Probe V2/2. Injektionsgeschwindigkeit von 3,4 kg/min ohne Vakuum. Volumenporosität: 0,21%. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre).	56

Bild 69: Gegenüberstellung der CT-Slices aus der Mitte der Z-Achse	57
Bild 70: 3D-Darstellung der Probe V5/1 mit Spülphase. Volumenporosität von 0,10%. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre)	58
Bild 71: 3D-Darstellung der Probe V5/2 mit Spülphase. Volumenporosität von 1,03%. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre)	58
Bild 72: 3D-Darstellung der Probe V1/1. Injektionsgeschwindigkeit von 1,5 kg/min. Volumenporosität: 0,13 %. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre).....	59
Bild 73: 3D-Darstellung der Probe V1/2. Injektionsgeschwindigkeit von 1,5 kg/min. Volumenporosität: 2,69 %. 60 µm Voxelgröße (Mikrofokusröhre).....	59
Bild 74: Gegenüberstellung der CT-Slices aus der Mitte der Z-Achse. Mit Spülphase: (a) V5/1, (b) V5/2, Ohne Spülphase: (c) V1/1, (d) V1/2.....	60
Bild 75: Skizze US-Prüfung in IE- und DS- Technik.....	63
Bild 76: A Bild IE-Technik, Darstellung der Amplitude über der Zeit.....	64
Bild 77: C-Bild 65	
Bild 78: B-Bild: Prinzipieller Aufbau eines B-Bildes (farbcodierte Amplitudendarstellung aufgetragen über die Tiefe).....	66
Bild 79: 3D-Darstellung Volumenporosität (2,58%) links und Flächenporosität (45,26%) rechts	68
Bild 80: C-Scan der Probe 4a.....	69
Bild 81: C-Bild des Probenbereichs, welcher mittels CT quantifiziert wurde	70
Bild 82: Gesamtes (l.) und reduzierte Volumina der Probe 4a.....	70
Bild 83: A-Bild zum Sektor [1-2] der Probe 4a	71
Bild 84: RW-Echo und zugehöriges Amplituden(betrags-) spektrum des Sektors [1-2] der Probe 4a	71
Bild 85: Frequenz über Volumenporosität, Probe 4a	73
Bild 86: Frequenz über Flächenporosität, Probe 4a.....	74
Bild 87: Volumenporosität bzw. Frequenz über Probensegmente [1-1] bis [3-3] der Probe 4a..	74
Bild 88: C-Bilder der Probe 4a mit unterschiedlichen Prüffrequenzen (v.l.n.r.: 5,10 und 15 MHz und zunehmende Empfangsverstärkung v.l.n.r.), eingeschränkt auf den Bereich des Rückwandechos.....	75
Bild 89: Zeit- und Spektraldarstellung des ET-Pulses am K1, (Mittenfrequenz 7.26 MHz, 3dB- Bandbreite 6.95 MHz)	76
Bild 90: Zeit- und Spektraldarstellung des RW-Pulses am K1, (Mittenfrequenz 5.13 MHz, 3dB- Bandbreite 3.33 MHz)	77
Bild 91: Skizze zur Verdeutlichung der frequenzabhängigen Nahfeldlänge und Bündeldivergenz, hierbei ist $\lambda_1 < \lambda_2$	77
Bild 92: C-Bild (l.) und XCT-Bild (r.) des untersuchten Probenbereichs der Probe 4a	78
Bild 93: B-Bild des CT-äquivalenten Bereichs der Probe 4a	78
Bild 94: C-Bild (links), XCT-Aufnahme(rechts) und B-Bild des CT-äquivalenten Bereichs in einer Tiefe von 0,5 bis 1mm.....	79
Bild 95: C-Bild (l.) und XCT-Aufnahme (r.) in einer Tiefe von 1,6 bis 2,4mm	80
Bild 96: Zeit- (oben) und Spektraldarstellung (unten) des 10MHz- ET-Pulses, Mittenfrequenz 8.60 MHz, 3dB-Bandbreite 5.02 MHz	81
Bild 97: Zeit- (oben) und Spektraldarstellung (unten) des 10MHz- RW-Pulses, Mittenfrequenz 4.4 MHz, 3dB-Bandbreite 5.75 MHz	81
Bild 98: C-Bilder verschiedener Probenpositionen, Benennung v.l.n.r.: 4a_00, 4a_01, 4a_02..	82
Bild 99: A- und B-Bild, sowie Deklaration der Anzeigen zur Position 00 der Probe 4a	82
Bild 100: Zeit- und Spektraldarstellung des ET-Pulses gemessen an Probenposition 4a_00....	83
Bild 101: Zeit- und Spektraldarstellung der an Probenposition 4a_00 indizierten Anzeigen bei 1.2 (oben) bzw. 2.6mm (unten), Mittenfrequenz 6.82 bzw. 5.99, 3dB- Bandbreite 5,28 bzw. 4.77 MHz.	84
Bild 102: Zeit- und Spektraldarstellung des an Probenposition 4a_00 aufgenommen RW- Pulses, Mittenfrequenz 4,94 MHz, 3dB- Bandbreite 4,17 MHz	85
Bild 103: A- und B-Bild, sowie Deklaration der Anzeigen zur Position 01 der Probe 4a	85
Bild 104: Zeit- und Spektraldarstellung des an Probenposition 4a_01 aufgenommen ET- Pulses, Mittenfrequenzen 4.63 und 8.28 MHz.....	86
Bild 105: Zeit- und Spektraldarstellung der an Probenposition 4a_01 indizierten Anzeigen bei 0.36 (oben) bzw. 1.26mm (unten), Mittenfrequenz 7.39 bzw. 6.94 MHz, 3dB- Bandbreite 6.26 bzw. 5.71 MHz.....	87
Bild 106: Zeit- und Spektraldarstellung des an Probenposition 4a_01 aufgenommen Pulses bei einer Tiefe von 3.6mm, Mittenfrequenz 3.97 und Bandbreite 2.83 MHz	88
Bild 107: Zeit- und Spektraldarstellung des an Probenposition 4a_01 aufgenommenen RW- Pulses, Mittenfrequenz: 5,37MHz, 3dB-Bandbreite 6,40 MHz	88

Bild 108: A- und B-Bild, sowie Deklaration der Anzeigen zur Position 02 der Probe 4a	89
Bild 109: Zeit- und Spektraldarstellung des an Probenposition 4a_02 aufgenommenen ET-Pulses, Mittenfrequenz: 4.65 MHz, 3dB-Bandbreite 3.46 MHz	89
Bild 110: Zeit- und Spektraldarstellung der an Probenposition 4a_02 indizierten Anzeigen bei 0.66 (oben) bzw. 1.77mm (unten), Mittenfrequenz 7.32 bzw. 7.73 MHz, 3dB-Bandbreite 5.74 bzw. 5.86 MHz.....	90
Bild 111: Zeit- und Spektraldarstellung der an Probenposition 4a_02 indizierten Anzeige bei 2,35mm. Mittenfrequenz 6.12 und Bandbreite 4.95 MHz.	91
Bild 112: Zeit- und Spektraldarstellung des an Probenposition 4a_02 aufgenommenen RW-Pulses, Mittenfrequenz: 3.90 MHz, 3dB-Bandbreite 5.51 MHz	91
Bild 113: Tabelle mit Werten aus Signalanalyse bei 5MHZ der Segmente [1-1] bis [3-3] der Probe 4a101	
Bild 114: Zeit und Spektraldarstellung des RW-Signals vom Sektor [1-1] der Probe 4a	102
Bild 115: Zeit und Spektraldarstellung des RW-Signals vom Sektor [1-2] der Probe 4a	102
Bild 116: Zeit und Spektraldarstellung des RW-Signals vom Sektor [1-3] der Probe 4a	103
Bild 117: Zeit und Spektraldarstellung des RW-Signals vom Sektor [2-1] der Probe 4a	103
Bild 118: Zeit und Spektraldarstellung des RW-Signals vom Sektor [2-2] der Probe 4a	104
Bild 119: Zeit und Spektraldarstellung des RW-Signals vom Sektor [2-3] der Probe 4a	104
Bild 120: Zeit und Spektraldarstellung des RW-Signals vom Sektor [3-1] der Probe 4a	105
Bild 121: Zeit und Spektraldarstellung des RW-Signals vom Sektor [3-2] der Probe 4a	105
Bild 122: Zeit und Spektraldarstellung des RW-Signals vom Sektor [3-3] der Probe 4a	106

Literatur

- [1] Ehrenstein G.: Faserverbundkunststoffe. Werkstoffe-Verarbeitung-Eigenschaften. München Wien, Hanser Verlag, 2006.
- [2] Reuter W.: Hochleistungs-Faser-Kunststoffverbunde mit Class-A-Oberflächenqualität für den Einsatz in der Fahrzeugaußenhaut. Schriftreihe des Instituts für Verbundkunststoffe GmbH, Band 19, 2002
- [3] Wielage B., Kim Y.-E.: Correlation of morphology and properties of CFRPs. Proc. Werkstofftechnisches Kolloquium, Chemnitz 2008
- [4] Wielage B., Richter D., Mucha H., Lampke T.: Influence of Fabric Parameters on Microstructure, Mechanical properties and Failure Mechanisms in Carbon-Fibre Reinforced Composites. J. Mater. Sci. Technol. 24, 953-959, 2008
- [5] Verein „Carbon Composites“, Seminar der Arbeitsgruppe Werkstoff- und Bauteilprüfung, Augsburg, 2009