

Analyse mittels Röntgen- Computertomografie: Vom Holz-Polymer- Verbundwerkstoff über ein Kohlenstofftemplat zur C/Si/SiC-Keramik

Bernhard PLANK *, Christian FÜRST **, Sascha SENCK *, Johann KASTNER *

* FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH, Stelzhamerstraße 23, 4600 Wels, Österreich

** Kompetenzzentrum Holz GmbH, Altenberger Straße 69, 4040 Linz, Österreich

Kurzfassung. Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Herstellung und Charakterisierung von C/Si/SiC-Keramiken aus einem Holz-Polymer-Verbundwerkstoff (WPC). Dabei werden die Proben zwischen den einzelnen Produktionsschritten mittels Röntgen-Computertomografie (XCT) analysiert, um die Vorgänge im Material besser zu verstehen. XCT wurde für diese erste Machbarkeitsstudie ausgewählt, da es sich dabei um eine effektive Methode handelt, größere Probenvolumina in den unterschiedlichen Fertigungszuständen zerstörungsfrei zu untersuchen. Zusätzlich zu XCT wurden an ausgewählten Proben sowohl Synchrotronmessungen, als auch zerstörende Referenzmethoden wie Quecksilberporosimetrie und materialografische Schliffpräparationen in Kombination mit Lichtmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie durchgeführt.

Die Herstellung einer Keramik erfolgt im Wesentlichen in drei Hauptschritten: WPC Grünkörper, Kohlenstofftemplat und fertig infiltrierte C/Si/SiC-Keramik. Mittels XCT werden die drei Herstellschritte sowohl qualitativ als auch quantitativ betrachtet. Qualitative Betrachtungen zeigen vor allem strukturelle Veränderungen der Probe während der einzelnen Herstellschritte. Poren im WPC bleiben oft im C-Templat erhalten und werden durch das Silizieren gefüllt. Risse entstehen meist durch das Karbonisieren. Für die qualitative Beurteilung sind Auflösungen zwischen $(70 \mu\text{m})^3$ und $(45 \mu\text{m})^3$ ausreichend. Mittels XCT können zusätzlich quantitative Aussagen über die einzelnen Phasenanteile in den verschiedenen Herstellschritten getroffen werden. Im WPC wurde mit Hilfe eines manuellen Schwellwertes der Holzanteil bestimmt. Bei den C-Templaten kam ein ISO62 Schwellwert zum Einsatz, um die Poren zu quantifizieren. Die XCT - Auswertungen korrelieren sehr gut mit den Auswertungen der Quecksilberporosimetrie und den lichtmikroskopischen Auswertungen. Auch bei der fertigen C/Si/SiC-Keramik korrelieren die XCT-Auswertungen gut mit denen des Lichtmikroskops, wobei durch die Probenpräparation im Lichtmikroskop ein höherer Anteil an Kohlenstoff und Luft bestimmt wird. Für die quantitative XCT-Auswertung sind Auflösungen zwischen $(2,5 \mu\text{m})^3$ und $(0,8 \mu\text{m})^3$ Voxelgröße notwendig.

1. Motivation und Einleitung

Siliziumkarbid (SiC) ist eine sehr bedeutende technische Keramik. Sie zeichnet sich vor allem durch die hohe Härte und Festigkeit bei relativ geringer Dichte ($\sim 3,2 \text{ g/cm}^3$) aus. Weitere positive Eigenschaften sind die guten thermischen Eigenschaften im Vergleich zu



Metallen bei hohen Temperaturen sowie die gute chemische Beständigkeit. Einschränkungen von SiC liegen vor allem in der meist relativ teuren Fertigung über die Faserinfiltration oder einen Sinterprozess. Dadurch beschränkt sich der Einsatz meist auf Spezialanwendungen aus der Luft- und Raumfahrt oder dem Motorsport. Aus diesem Grund wird in der Materialentwicklung der Einsatz von erneuerbaren Ressourcen immer mehr gefordert. In dieser Arbeit werden Ergebnisse der Charakterisierung von biogenen C/Si/SiC-Keramiken präsentiert, die auf der Basis von Holz-Polymer-Verbundwerkstoffen (WPC – wood polymer composites) hergestellt wurden.

Um die Produktionskosten zu reduzieren, werden WPCs entweder durch Extrusion oder Spritzguss hergestellt. Dadurch lassen sich relativ kostengünstig 3D-Strukturen oder Endlosprofile fertigen. Diese WPCs dienen als Grünkörper für die spätere Keramik und werden im zweiten Fertigungsschritt unter inerter Atmosphäre zwischen 900 und 1600 °C karbonisiert. Das somit erhaltene poröse Kohlenstoff-Templat (C-Templat) wird dann im letzten Fertigungsschritt unter Vakuum bei 1600 °C mit flüssigem Silizium (Si) infiltriert. In diesem letzten Fertigungsschritt reagiert das flüssige Silizium mit dem Kohlenstoff (C) zu SiC und es bildet sich die SiC-Keramik mit Resten an C und Si. [1]

Um die gesamte Prozesskette einer biogenen C/Si/SiC-Keramik (WPC → C-Templat → Keramik) besser verstehen zu können, wurde diese mittels Röntgen-Computertomografie (XCT) untersucht. Bei XCT handelt es sich um eine zerstörungsfreie Methode, mit der die gesamte Prozesskette sowohl qualitativ als auch quantitativ zu untersucht werden kann [2]. Im Gegensatz zu synthetisch hergestellten Basismaterialien (z.B. verwebte Kohlenstofffaser) [3] liegen die Schwierigkeiten bei der XCT-Charakterisierung von Bauteilen basierend auf nachwachsenden Rohstoffen (z.B. Holzfasern) vor allem darin, dass die beinhaltenden Phasen nur unstrukturiert in den einzelnen Fertigungszuständen vorliegen. Des Weiteren haben diese Strukturen Abmessungen im Bereich von unter 1 µm bis max. ~500 µm. Die starke Schrumpfung (~25 %) des WPC beim Karbonisieren erschwert den Auswerteprozess zusätzlich. Die XCT-Ergebnisse wurden mit Referenzmethoden wie Lichtmikroskopie (LOM), Rasterelektronenmikroskopie (REM + EDX), sowie Quecksilberporosimetrie verglichen.

2. Experimentelles

2.1 Untersuchte Proben

Um die Prozesskette einer biogenen C/Si/SiC-Keramik zu untersuchen, wurden aus jedem Fertigungsschritt einzelne Proben ausgewählt. Die untersuchte Probengröße lag im Fertigungsschritt (I) für die qualitative XCT-Auswertung bei max. 81*25*81 mm³ (WPC). Die WPCs wurden mit einem Holzanteil von 50...62 Gew.-% durch Extrusion gefertigt, wobei die Holzpartikelverteilung zwischen 100 und 500 µm lag. Die Matrix besteht aus 25...32 Gew.-% Phenolharz sowie 6...16 Gew.-% thermoplastischer Modifikatoren und Verarbeitungshilfsmittel.

Im Fertigungsschritt (II) erfolgte die Pyrolyse des WPC unter inerter Atmosphäre (Stickstoff und Argon) zwischen 900 und 1600 °C. Durch die Schrumpfung (~25 %), lag die maximale Probengröße bei den porösen C-Templats bei ca. 60*20*60 mm³.

Im Fertigungsschritt (III) änderte sich die Probengröße nicht mehr. Das Silizieren nach dem LSI-Prozess (Liquid Silicon Infiltration) erfolgte bei 1600 °C und unter Vakuum (1-5 mbar).

2.2 Röntgen- Computertomografie und Datenauswertung

Abhängig von der Probengröße und der maximalen Durchstrahlungslänge wurden die Tomografien an zwei verschiedenen Geräten durchgeführt. Alle Proben mit einer Durchstrahlungslänge größer 40 mm wurden an einem RayScan 250 E tomografiert. Dieses Gerät ist mit einem 2048² px Flachbett-Detektor, einer 225 kV Mikro- und einer 450 kV Minifokus Röntgen-Röhre ausgestattet.

Kleinere Proben (vor allem für die quantitative Auswertung) wurden an einem GE phoenix|x-ray nanotom 180 NF tomografiert. Dieses Gerät ist mit einem 2304² px Flachbett-Detektor und einer 180 kV Nanofokus Röntgen-Röhre ausgestattet. Als Target-Material kam Wolfram bzw. Molybdän auf einem Berylliumfenster zum Einsatz.

Die verwendete Voxelgröße (VS) lag zwischen (0.8 µm)³ und (70 µm)³. Einen Überblick über die verwendeten Messparameter gibt Tabelle 1.

Tabelle 1. XCT-Parameter für RayScan 250 E (grau) und GE Nanotom 180 NF. Die beschriebenen Parameter sind die Spannung (U) und der Strom (I) an der Röntgen-Röhre, die Integrationszeit (Tint) am Detektor, die Anzahl an Projektionen (n) und die resultierende Zeit (Ttom) bei der jeweiligen Voxelgröße (VS).

Probe / Material	VS [µm]	U [kV]	I [µA]	n	Tint [ms]	Ttom [min]	Vorfilter [mm]	Target
WPC (Abb. 1 & 2)	70	100	700	1444	1999	92	Cu 0.5	W
C-Templat (Abb. 1 & 2)	45	100	450	1080	4000	184	Cu 0.5	W
C/Si/SiC-Keramik (Abb. 1 & 2)	52.2	150	300	1444	1999	92	Cu 0.5	W
WPC (Abb. 3)	2.5	50	150	1500	1300	195	-	Mo
C-Templat (Abb. 4, 5 & 7)	2	50	190	1500	900	135	-	Mo
C/Si/SiC-Keramik (Abb. 6 & 7)	0.8	60	410	1700	1200	272	Al ~0.1	W

Die XCT-Datenauswertung erfolgte mit VG Studio Max 2.2. Zur Quantifikation der Holzanteile in den WPCs wurde ein manueller Schwellwert nach visueller Beurteilung gewählt. Um die Porosität in den C-Templats zu bestimmen, wurde ein ISO62 Schwellwert ($ISO62 = LuftP + (MatP - LuftP) * 0,62$) nach „kalibrieren“ mit der Quecksilberporosimetrie angewendet [4]. Für die C/Si/SiC-Keramik wurden manuelle Schwellwerte nach visueller Beurteilung gewählt. Zusätzlich erfolgte bei der C/Si/SiC-Keramik eine „closing/opening“ Prozedur von einem Voxel, um das Rauschen an den segmentieren Si-Strukturen zu reduzieren. Der Si-Anteil ergibt sich aus der Subtraktion der segmentierten Voxel für Poren/C von den Voxel mit Si+Poren/C. Der verbleibende SiC-Anteil im Messbereich wird Anhand der segmentierten Poren/C-Anteile und Si-Anteile rein rechnerisch ermittelt.

2.3 Referenzmethoden

Das Präparieren und Schleifen der Proben erfolgte an einer Struers LapPol5 (mit LaboForce3 Probenhalter). Die lichtmikroskopischen Untersuchungen (LOM) wurden an einem Olympus Mikroskop mit integrierter Kamera durchgeführt. Raster-Elektronenmikroskopie (REM) -Untersuchungen erfolgten an einem TESCAN VEGA LMU 2, ausgestattet mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) von Oxford. Die Untersuchungen mittels Quecksilberporosimetrie (Hg-Porosimetrie) wurden extern (Fa. Porotec GmbH) an einem “Pascal Mercury Intrusion Porosimeter” von Thermo Scientific durchgeführt. Die Berechnung des Porenanteils basiert auf einfachen mathematischen Modellen (Washburn Gleichung [5]). Die Synchrotron Computertomografie (sXCT) wurde am DESY in Hamburg mit einer Energie von 18 keV durchgeführt. Die Rekonstruktion erfolgte mit (1.2 µm)³ Voxelgröße.

3. Ergebnisse

3.1 Qualitativ

Mittels XCT konnten die geometrischen und strukturellen Änderungen innerhalb einer Probe während der einzelnen Fertigungsstufen evaluiert werden (Ex situ). Bei der qualitativen Auswertung der XCT-Daten bei relativ geringer Auflösung ($> (45 \mu\text{m})^3$ Voxelgröße) können vor allem größere Poren, Risse und nicht weiter bestimmte Inhomogenitäten (höhere oder geringere Dichte als die Matrix) dargestellt werden. Abbildung 1 zeigt die gleiche Schnittebene in einer Probe nach den unterschiedlichen Fertigungsschritten. Während dem Karbonisieren (Fertigungsschritt (II)) schrumpft das WPC gegenüber dem C-Templat um fast 25 %. Neben dem Schrumpfen kann sich aber auch ein Verzug (rote Linie - durch Eigenspannungen im WPC) fast gänzlich im C-Templat auflösen. Durch das Karbonisieren entstehen auch Risse in der Probe (#2.1), die im WPC (#1.1) an dieser Position noch nicht vorhanden waren. Durch den Fertigungsschritt (III), dem Silizieren, werden diese Strukturen (#3.1) wieder geschlossen, bzw. mit Si aufgefüllt. Andere Strukturen die zum Teil bereits im WPC vorhanden sind (#1.2) bleiben durch die einzelnen Fertigungsschritte nahezu unbeeinflusst (#2.2 und #3.2).

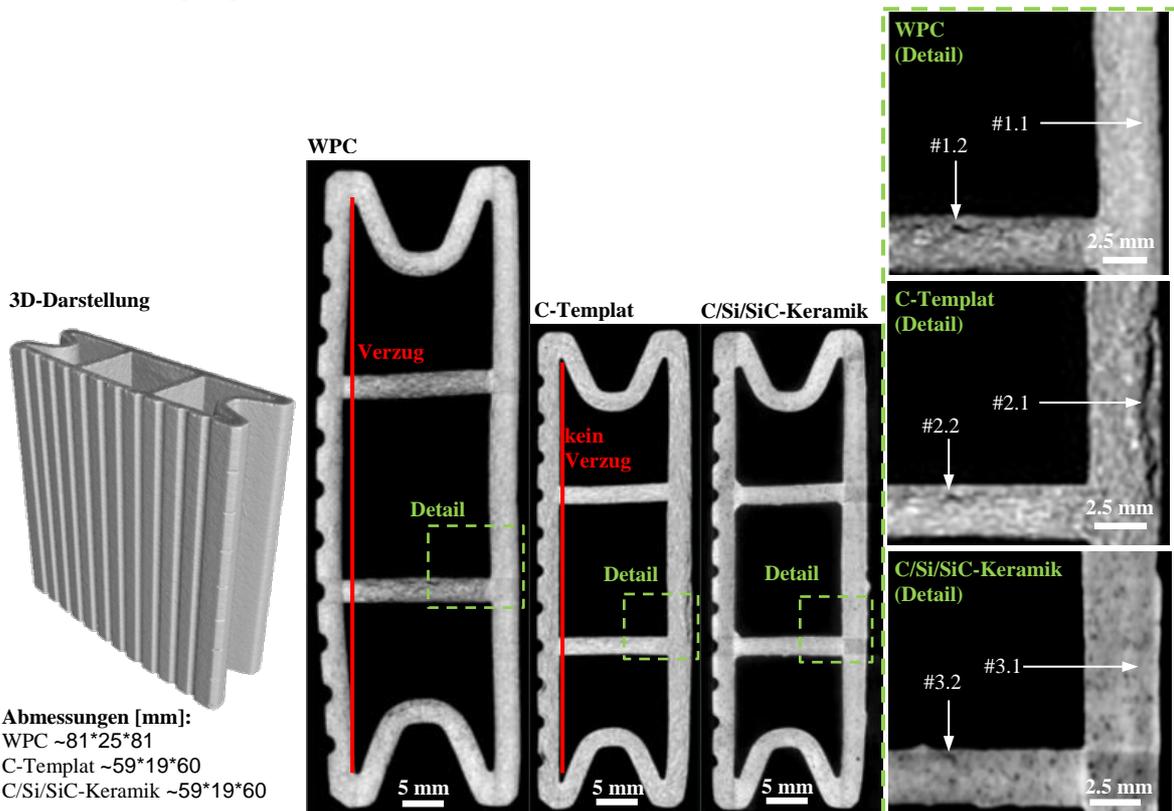


Abb. 1. XCT-Schnittbilder sowie Detailausschnitte an derselben Position innerhalb einer Probe nach den drei verschiedenen Fertigungsschritten (Ex situ): Voxelgröße v.l.n.r.: $(70 \mu\text{m})^3 / (45 \mu\text{m})^3 / (52 \mu\text{m})^3$

Weitere strukturelle Änderungen während der Prozesskette sind in Abbildung 2 dargestellt. Risse, die im WPC und C-Templat vorhanden sind, werden durch das Silizieren wieder geschlossen. Gesondert hervorzuheben ist jedoch eine geringfügig höherdichte Inhomogenität (#1.3) im WPC, die durch das Karbonisieren bei $900 \text{ }^\circ\text{C}$ im C-Templat erhalten bleibt (#2.3). Auf Grund der nun deutlich geringeren Dichte (dadurch geringere Röntgen-Absorption) der umliegenden Matrix (Kohlenstoff) erscheint diese Inhomogenität nun eindeutig als höherdichte Struktur in den XCT-Daten. Diese Struktur bleibt nach dem

Silizieren mit flüssigem Silizium bei ca. 1600 °C noch erhalten (#3.3). In den XCT-Daten ist diese jetzt aber als niederlichte Inhomogenität zu interpretieren, da im Vergleich dazu die Matrix nun aus vorwiegend stark absorbierendem SiC besteht.

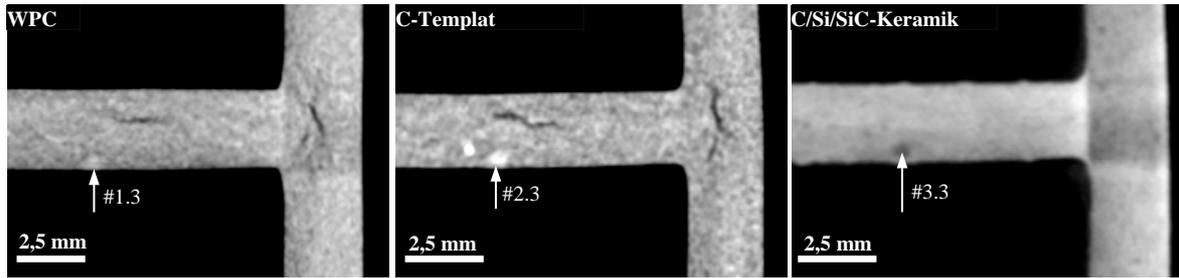


Abb. 2. Detailausschnitte von XCT-Schnittbilder an derselben Position innerhalb einer Probe nach den drei verschiedenen Fertigungsschritten (Ex situ): Voxelgröße v.l.n.r.: $(70 \mu\text{m})^3$ / $(45 \mu\text{m})^3$ / $(52 \mu\text{m})^3$

3.2 Quantitativ

3.2.1 WPC Grünkörper

In den WPC-Grünkörpern sind neben der Polymermatrix vor allem Holzpartikel und Fasern, Poren und Risse sowie nicht näher definierte höherlichte Inhomogenitäten vorhanden. Für die weiteren Produktionsschritte ist vor allem der Holzanteil relevant, welcher mit einem manuellen Schwellwert in Abbildung 3 segmentiert wurde. Die Segmentierung an dieser Probe ergibt einen Holzanteil von ~53 Vol.-%. Als Referenzwert liegt für diese Probe lediglich der bei der Fertigung eingestellte Holzanteil von 55 Gew.-% vor. Die Segmentierung ist stark von den Kontrasten und der Auflösung zwischen den Holzpartikel/ Holzfasern und der Polymermatrix (Phenolharz + thermoplastischer Modifikatoren) abhängig. Wird eine andere Polymerzusammensetzung gewählt, können sich diese Kontraste deutlich verändern. In (c) ist zum Beispiel ein weiteres WPC mit einer anderen Polymerkomposition (nur Phenolharz) dargestellt, an welchem eine Segmentierung und Quantifizierung der Holzpartikel auf Grund des geringen Kontrastes kaum sinnvoll ist.

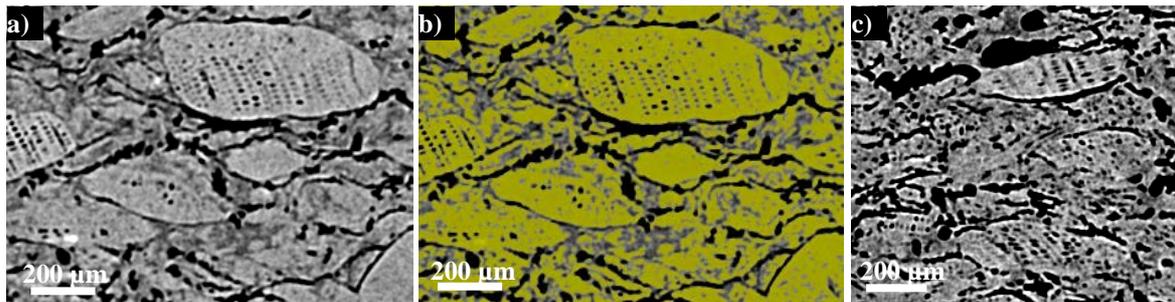


Abb. 3. Detailausschnitte von XCT-Schnittbilder an WPC -Grünkörper mit einer reinen Phenolharzmatrix (c) und mit zusätzlichen thermoplastischer Modifikatoren (a) & (b). (b) zeigt die Segmentierung der Holzpartikel mit manuellem Schwellwert (~53 Vol.-%). Gauss 5, Voxelgröße $(2,5 \mu\text{m})^3$

3.2.2 C-Templat

Das C-Templat besteht vorwiegend aus Kohlenstoff (karbonisiertes Holz und karbonisiertem Phenolharz) sowie Luft in Form von meist zusammenhängenden Porennetzwerken. Vereinzelt höherlichte Inhomogenitäten (helle Partikel) werden für die weitere Quantifizierung ignoriert. Für die Segmentierung dieser Porenstrukturen wurde ein globaler ISO62 Schwellwert angewendet. In Abbildung 4 ist links ein XCT-Schnittbild mit

dazugehöriger Segmentierung (34,8 Vol.-%) dargestellt. Die Porenstrukturen sind meist relativ klein, wobei in den C-Templats immer wieder auch deutlich größere Poren mit $> 250 \mu\text{m}$ Durchmesser zu finden sind. In den Diagrammen (rechts) werden die Ergebnisse der XCT-Auswertung mit Hg-Porosimetrie und LOM verglichen. Dazu wurden sechs unterschiedlich hergestellte C-Template untersucht. Beim Vergleich von XCT mit Hg-Porosimetrie zeigt sich eine sehr gute Korrelation der Ergebnisse. Nur ein Wert (rot) weicht deutlich ab. Diese Abweichung ist beim Vergleich der XCT-Werte mit LOM deutlich geringer (grün). Beim Vergleich LOM mit Hg-Porosimetrie ist erneut eine höhere Abweichung zwischen den beiden Methoden ersichtlich. Generell lässt sich aus diesen Diagrammen auch ableiten, dass mittels LOM tendenziell eine etwas höhere Porosität ermittelt wird, als mit XCT bzw. Hg-Porosimetrie.

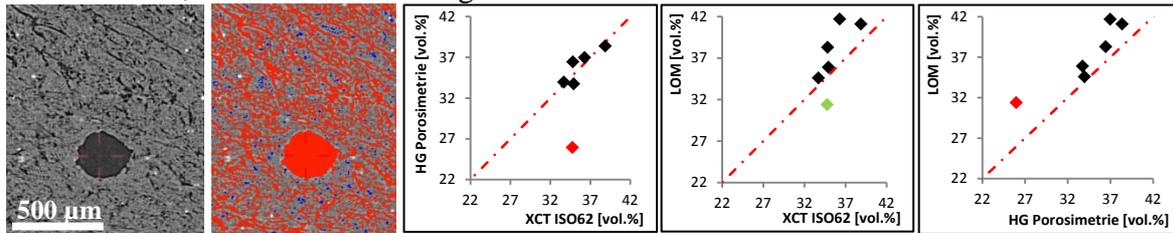


Abb. 4. Detailausschnitte von XCT-Schnittbilder aus einem C-Templat (links) mit ISO62 Schwellwert segmentiert (Typ 5: 34,8 Vol.-%). Gauss 5, Voxelgröße $(2 \mu\text{m})^3$. Die Diagramme stellen die Porositätsauswertung von XCT versus Hg-Porosimetrie und LOM bzw. Hg-Porosimetrie versus LOM dar.

Das Diagramm in Abbildung 5 (rechts) zeigt die Ergebnisse der Porositätsbestimmung mittels XCT, LOM und Hg-Porosimetrie (siehe Abb. 4). Die Werte liegen bei den meisten Proben sehr nahe beisammen, nur bei C-Templat Typ 5 weichen die Werte der unterschiedlichen Messmethoden deutlich von einander ab. Mittels XCT wurde an einer weiteren Probe von Typ 5 noch eine zusätzliche Messung und Auswertung durchgeführt. Das Ergebnis liegt sehr nah an der ersten XCT-Auswertung. Das 3D-Bild (links) zeigt sehr gut, dass die Poren alle miteinander verbunden sind (rot) und nur wenige separierte Bereiche (blau, grün) vorhanden sind.

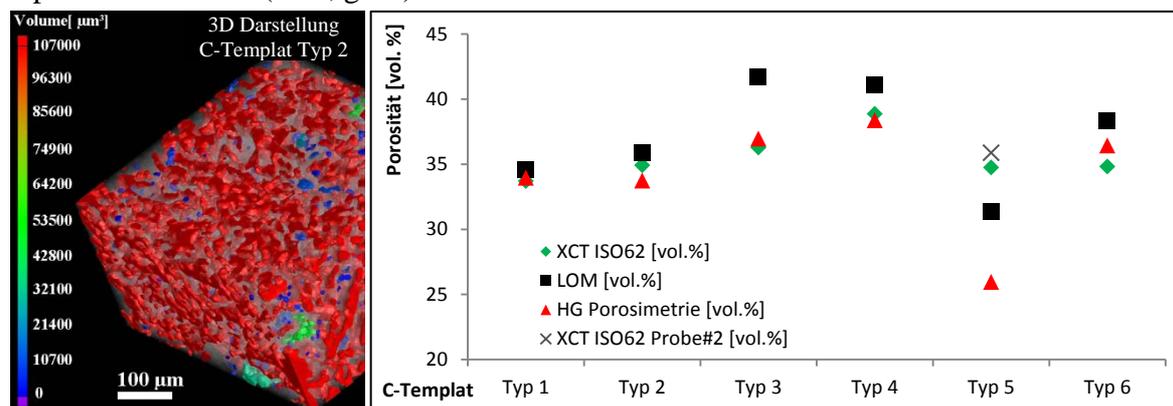


Abb. 5. 3D-Darstellung der segmentierten Poren aus den XCT-Daten eines C-Templats (links) mit ISO62 Schwellwert. Gauss 5, Voxelgröße $(2 \mu\text{m})^3$. Das Diagramm zeigt die Ergebnisse der Porositätsbestimmung mittels XCT, LOM und Hg-Porosimetrie an sechs verschiedene C-Templat Typen.

3.2.3 C/Si/SiC-Keramik

Die fertige C/Si/SiC-Keramik besteht vorwiegend aus SiC, wobei als Reste noch C, Si und Luft in der Probe vorhanden sind. Je höher der SiC-Gehalt, desto hochwertiger ist die Keramik, wodurch nach dem letzten Fertigungsschritt alle vorhanden Phasen quantifiziert werden sollen. Einzelne höherdichte Inhomogenitäten in den XCT-Daten (hell) werden

nicht näher quantifiziert. Abbildung 6 zeigt ein XCT-Schnittbild einer C/Si/SiC-Keramik (links). In den Detailausschnitten (Mitte) wurde die Segmentierung der Si-Phase (gelb) und der Poren + Kohlenstoff (rot) anhand eines manuell festgelegten Schwellwertes durchgeführt. Der Anteil der verbleibenden SiC-Phase (grau) wurde rechnerisch ermittelt. Zusätzlich wurden die XCT-Daten mit Schliffen und LOM (rechts) verifiziert. Die Si und SiC Phasen im LOM stimmen sehr gut mit den XCT-Daten überein. Zwischen den beiden Phasen (Rest-)Kohlenstoff und Luft konnte mit keiner Methode unterschieden werden, wobei im LOM diese Phasen deutlich größer erscheinen als in den XCT-Daten.

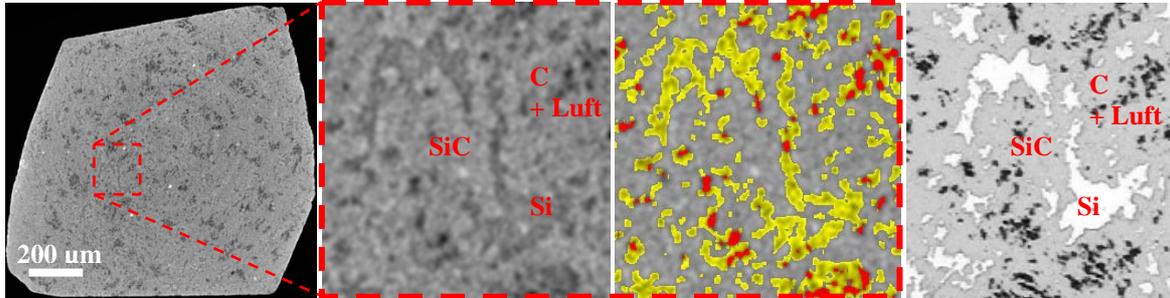


Abb. 6. XCT-Schnittbild und Detaildarstellung einer C/Si/SiC-Keramik (links) sowie Segmentierung der Si-Phase (gelb) und der Poren+C (rot). Gauss 5, Voxelgröße $(0,8 \mu\text{m})^3$. Korrelierende LOM-Darstellung (rechts).

Die quantitativen Daten aus der Segmentierung mittels XCT und LOM sind in Tabelle 2 dargestellt. Der SiC Gehalt stimmt mit beiden Methoden gut überein. Vor allem beim Rest-Kohlenstoffgehalt und der Luft werden mit LOM deutlich höhere Werte ermittelt als mit XCT. XCT ermittelt stattdessen einen deutlich höheren Si-Anteil als es bei LOM der Fall ist. Je nach Schliffebene schwanken die Werte mit LOM um über 2 Vol.%, wodurch für eine vollständige Quantifizierung der Probe mehrere Schliffe durchgeführt werden müssen.

Tabelle 2. Quantifizierung der Phasenanteile in der C/Si/SiC-Keramik aus Abbildung 6 mit XCT und LOM.

Phasenanteil	XCT	LOM Schliff 1	LOM Schliff 2	Mittelwert LOM
Si [Vol.-%]	~11,3	~5,4	~8,4	~6,9
C + Luft [Vol.-%]	~2,7	~6,7	~6	~6,35
SiC [Vol.-%]	~85,6	~87,9	~85,6	~86,75

4. Diskussion und Zusammenfassung

XCT zeigt im direkten Vergleich mit Referenzmethoden wie LOM oder Hg-Pososimetrie eine sehr gute Übereinstimmung. Beim WPC liegen im Rahmen dieser Arbeit keine quantitativen Werte für den Holzgehalt vor, aber der qualitative Vergleich zwischen LOM und XCT in Abbildung 7 (links) zeigt, dass der Kontrast zwischen Holz und der Polymermatrix mit LOM noch geringer sein kann als mit XCT. Zusätzlich brechen bei der Probenpräparation einzelne Partikel aus, die die Quantifizierung mittels LOM noch deutlich fehleranfälliger macht. Das Ausbrechen von Partikeln bei der Probenpräparation für LOM zieht sich durch alle Fertigungsschritte. Beim C-Templat lassen sich XCT und LOM prinzipiell gut vergleichen, wobei auch hier wieder einzelne Ausbrüche die quantitativen Auswertungen mittels LOM erschweren (Abbildung 7 (rechts)). Diese Ausbrüche führen schlussendlich auch zu einer tendenziell höheren Porosität im Vergleich zu Hg-Pososimetrie und XCT, wie in den Diagrammen in Abbildung 4 (rechts) ersichtlich ist.

Abbildung 8 zeigt den Vergleich der gleichen Detailausschnitte mittels XCT, sXCT, LOM und REM. XCT und sXCT liefern ähnliche Details, wobei prinzipiell der Kontrast zwischen Si und SiC mittels sXCT besser erscheint. (Rest-)Kohlenstoff + Luft sowie Si lassen sich mit den gewählten sXCT Parameter allerdings schlechter unterscheiden als bei

XCT. Im Gegensatz zu den beiden XCT-Methoden lassen sich mittels LOM die Si- und die SiC- Phasen sehr gut voneinander unterscheiden, die C- und Luft- Phasen wirken dagegen deutlich größer. Die REM Aufnahmen zeigen, dass diese C- und Luft- Phasen deutlich weniger groß sind, wodurch hier mittels LOM und der geringen Schärfentiefe ein deutlich höhere C- und Luft- Anteil bestimmt wird, was auch anhand der quantitativen Auswertungen in Tabelle 2 ersichtlich ist.

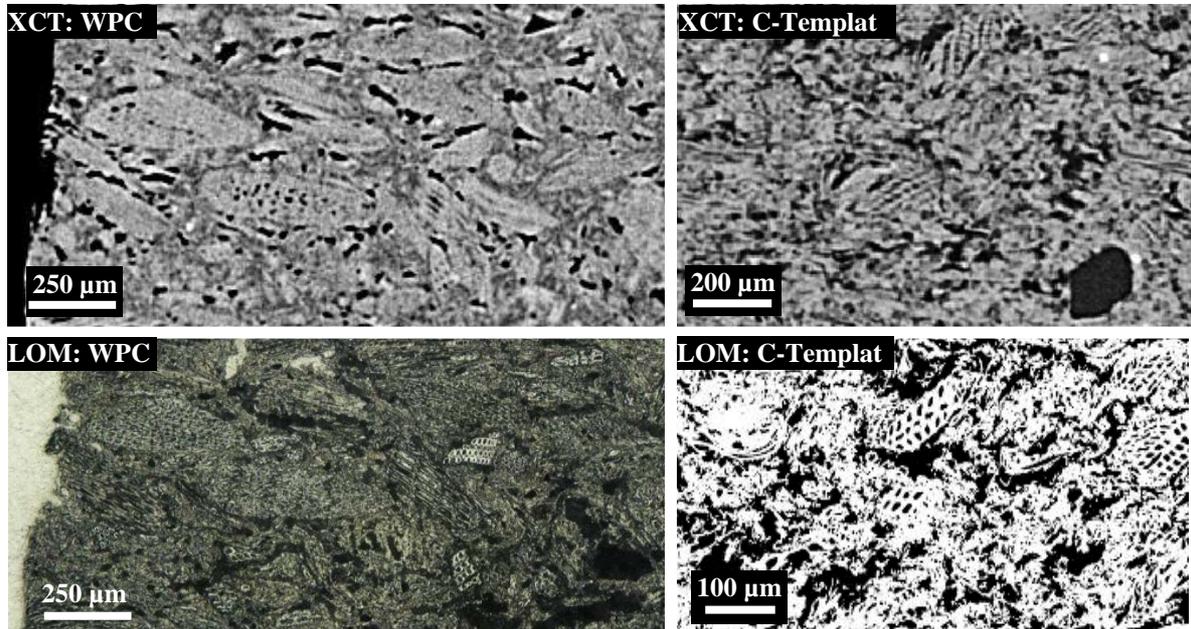


Abb. 7. XCT-Schnittbilder (oben) gegenübergestellt mit LOM Aufnahmen (unten) von WPC (links) und C-Templat (rechts).

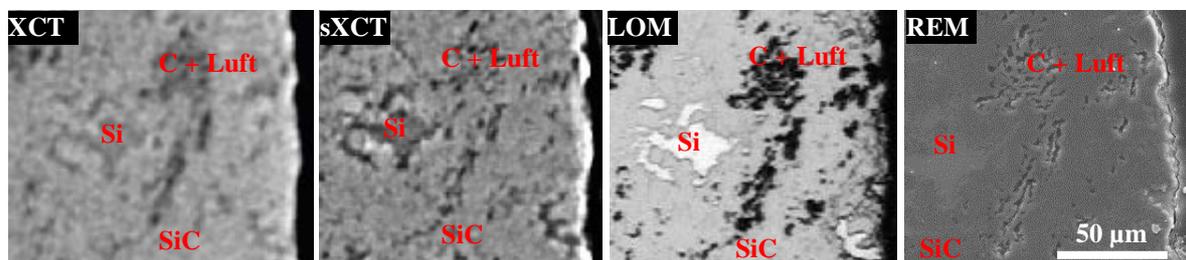


Abb. 8. Methodenvergleich anhand der gleichen Strukturen in einer C/Si/SiC-Keramik.
v.l.n.r.: XCT (Voxelgröße $(0,8 \mu\text{m})^3$), sXCT (Voxelgröße $(1,2 \mu\text{m})^3$), LOM und REM.

Danksagung

Diese Arbeit wurde finanziert durch das Projekt HMV-3D und die Programme “Regio13—Regionale Wettbewerbsfähigkeit” der Europäischen Kommission, durch den Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) und der Oberösterreichischen Landesregierung. Weiter Dank gebührt Markus Gillich von der Fachhochschule Oberösterreich für die REM-Untersuchungen und Guillermo Requena von der TU-Wien für die sXCT Untersuchung.

Referenzen

- [1] Fürst C., Katzenberger O; Porous carbon-templates for biogenic SiC-ceramics on the basis of extruded thermoset-based wood polymer composites; Proc. Cellular Materials, 7-9. Nov. 2012, Dresden, Germany, (2012).
- [2] J. Kastner – Editor; Proceedings: Conference on Industrial Computed Tomography (iCT2014); Wels, Austria, (2014).
- [3] J.M. Hausherr, et al., Material characterisation of C/SiC: Comparison of computed-tomography and scanning electron microscopy. In Conference on Damage in Composite Materials, (2006).
- [4] B. Plank, S. Senck, C. Fürst, H. Scharleitner, J. Kastner; Qualitative and quantitative analysis of the process chain: Wood polymer composite – C-template – C/Si/SiC-ceramic by means of X-ray computed tomography; Proceedings of Conference on Industrial Computed Tomography (iCT2014), Wels, Österreich, pp. 55-62, (2014).
- [5] Edward W. Washburn, The Dynamics of Capillary Flow. In: Physical Review. Band 17, Nr. 3, S. 273–283 (1921).