

Mikro-Radiografie und Mikro- Computertomografie mit Absorptions-und Phasenkontrast für die Materialcharakterisierung

Johann KASTNER¹

¹ FH Oberösterreich, Wels, Österreich

Kontakt E-Mail: johann.kastner@fh-wels.at

Kurzfassung. Mikro-Radiografie (RT) und Mikro-Röntgencomputertomografie (CT) sind Verfahren, die seit vielen Jahren in der Materialcharakterisierung eingesetzt werden. In diesem Beitrag werden insbesondere hochauflösende Verfahren und Phasenkontrastverfahren präsentiert, wobei verschiedenste Anwendungen aus dem Kunststoff und Metallbereich präsentiert werden.

Röntgen-Computertomografie (CT) entwickelte sich aus den Diagnoseverfahren der Medizin und wird nun schon seit mehr als 10 Jahren sehr erfolgreich für technische Anwendungen eingesetzt. CT findet Anwendung in der zerstörungsfreien Prüfung von Bauteilen und Werkstoffen, der messtechnische Erfassung von Außen- und Innengeometrien und in einer Vielzahl anderer Gebiete. Mit modernen Mikrofokus- oder Nanofokusröhren und dementsprechend hochauflösenden Detektoren erreicht man auch mit Laborgeräten Auflösungen von deutlich unter 1 µm. Es werden Ergebnisse von unterschiedlichsten Werkstoffen wie Holz, Kunststoffe und Metalle präsentiert. Mittels CT wird „virtuelle Metallografie bzw. Materialografie“ betrieben und es können verschiedene Phasen wie Fe-Aluminide, Mg₂Si oder Poren in Aluminium-Legierungen aufgelöst werden. Bei glasfaserverstärkten Kunststoff-Proben (GFK) lassen sich beispielsweise die einzelnen Glasfasern mit CT auflösen und mittels geeigneten Softwaretools entsprechend quantifizieren. Quantitative Daten von Fasern können die Orientierung, der Durchmesser oder die Länge der einzelnen Fasern sein, mit denen in weitere Folge auf mechanische Eigenschaften des Polymers rückgeschlossen werden kann. Darüber hinaus bietet die CT-Technologie die Möglichkeit, In-situ Untersuchungen durchzuführen. Beispielsweise können In-situ-Zugversuche direkt im CT durchgeführt werden, um das Schädigungsverhalten eines Werkstoffes besser zu verstehen.

Mit der konventionellen CT kann eine dreidimensionale Verteilung des Absorptionskoeffizienten erfasst werden. Mit Hilfe eines Talbot-Lau Interferometers kann eine differentielle Phasenkontrasttomografie durchgeführt werden, bei der gleichzeitig die Absorption, die Phasenverschiebung und das Streufeldbild (=Dunkelfeldbild) ermittelt werden. In diesem Beitrag werden kohlenstofffaserverstärkte Kunststoff Lamine (CFK) sowie glasfaserverstärkte Kunststoffproben mittels eines Talbot-Lau Interferometermessaufbaus untersucht. Die Dunkelfeldtomografie ermöglicht eine Charakterisierung der einzelnen Kohlenstoff-Faserbündel in den CFK-Proben. Die anisotropen Eigenschaften der Ultrakleinwinkelstreuung werden dazu verwendet, um Richtungsinformationen auf Mikrostrukturebene aus der Probe zu generieren. Anhand der CFK-Laminen

können dadurch die einzelnen gleichgerichteten Faserbündel extrahiert werden, obwohl die einzelnen Kohlenstofffasern deutlich unter der Auflösungsgrenze liegen. Durch Kombination von zwei aufeinander normalen Dunkelfeld-CT Messungen können somit die Gewebearten von 0/90 Grad Gelegen visualisiert und quantifiziert werden. In mittels Spritzguss hergestellten GFK-Proben werden in den Dunkelfeld-CT Daten die Faserhauptorientierungen in den Materialien sichtbar. Somit ist eine qualitative Darstellung von anisotropen Faserorientierungen (z.B. Bindenähte) möglich.

1. Einführung

Röntgen-Computertomografie (CT) wird in den letzten 10 Jahren immer häufiger in technischen und industriellen Bereichen angewendet [1,2,3]. Diese Entwicklung lässt sich durch Studien über die weltweit verkauften CT-Geräte als auch die steigenden Forschungsaktivitäten im Bereich CT belegen. Die Automobil-, Kunststoff- und Flugzeugindustrie gehören zu den Pionieren der industriellen CT. Dabei findet CT Anwendung in der zerstörungsfreien Prüfung von Bauteilen und Werkstoffen und der messtechnischen Erfassung von Außen- und Innengeometrien. In einer Vielzahl von anderen Forschungsgebieten wie z.B. Archäologie und Kunst werden mittels CT Fragestellungen nach verborgenen Strukturen, Erhaltungszustand und Entstehungsweise untersucht.

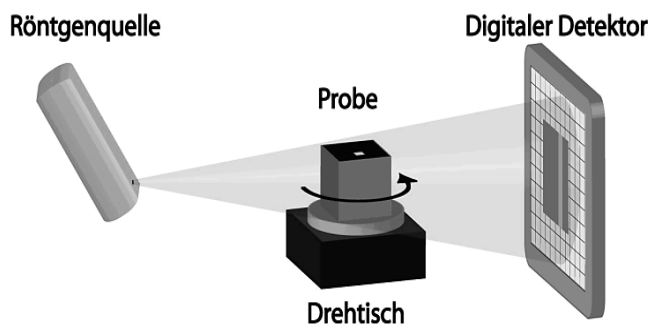


Abb.1a: Messprinzip der Kegelstrahl-Röntgencomputertomografie

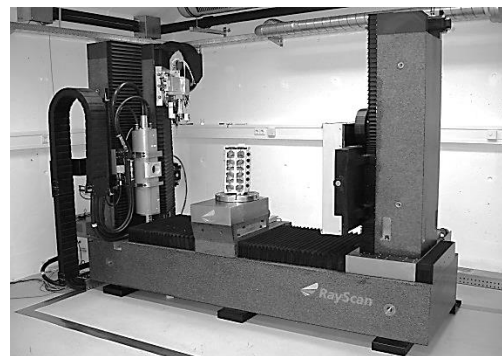


Abb.1b: Bild eines CTs der FH OÖ Wels – RayScan 250E

Röntgen- Computertomografie ist eine zerstörungsfreie Prüfmethode, die es ermöglicht, die gesamte Volumeninformation eines Prüfkörpers zu ermitteln. Im Prinzip besteht ein 3D-Röntgencomputertomograf aus drei Komponenten: der Strahlenquelle (Röntgenröhre), einem Drehtisch auf dem die zu prüfende Probe befestigt wird und einem digitalen Detektor. Der prinzipielle Aufbau ist in Abbildung 1a dargestellt. Die Strahlenquelle erzeugt einen kegelförmigen Röntgenstrahl, welcher das Prüfobjekt am Probentisch durchstrahlt. Beim Durchstrahlen eines Objektes wird die Röntgenstrahlung unterschiedlich stark abgeschwächt. Die Stärke der Abschwächung wird unter anderem durch die Probendicke (Durchstrahlungslänge), die Dichte der Bauteile und der Ordnungszahlen der zu durchstrahlenden Materialien bestimmt. Der digitale Detektor wandelt schlussendlich die Strahlungsintensität in ein digitales Projektionsbild um. Für eine vollständige CT-Messung wird eine volle Umdrehung des Messobjektes im Strahlenkegel der Röntgenstrahlung durchgeführt und eine finite Anzahl von Projektionen aufgenommen. Diese Projektionsbilder werden mittels eines mathematischen Algorithmus in ein virtuelles 3D-Volumen umgerechnet. Dieses 3D-Volumen setzt sich aus den sogenannten Voxeln (Volumen-Pixeln) zusammen, denen Grauwerte zugewiesen werden, die im Wesentlichen

der Dichte und der Ordnungszahl des Materials an der jeweiligen Stelle im Messobjekt entsprechen [1,2,3].

Das CT-Verfahren erfordert eine vollständige Abbildung des Messobjekts auf dem Detektor in jeder einzelnen Projektion. Dies führt dazu, dass der größte Durchmesser des Messobjekts die Auflösung bestimmt. Um Defekte und Materialinhomogenitäten wie Poren, Lunker, Risse oder Einschlüsse und deren Position, Art, Form und Größe im 3D-Volumen eindeutig erkennen zu können, benötigt man die Information mehrerer benachbarter Voxel. Die maximale Voxelauflösung errechnet sich dabei aus dem maximalen Prüflingsdurchmesser in mm dividiert durch die Anzahl der zur Verfügung stehenden Pixel innerhalb einer Detektorzeile. Die FH OÖ Wels beschäftigt sich nunmehr seit 11 Jahren mit der industriellen CT und hat 3 CT-Systeme im Einsatz. CT ist durch folgende Eigenschaften charakterisiert:

- CT ist eine zerstörungsfreie Methode
- CT ist eine Methode, die das komplette Bauteil – auch Innengeometrien – erfasst
- CT hat hohe Wachstumsraten (ca. 10-15 %/Jahr)
- Aufgrund der rasanten Entwicklung der Informationstechnologien werden CT-Daten immer leichter verarbeitbar.

Die Hauptanwendungen von CT sind:

- Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und 3D-Materialcharakterisierung
- Messung von Faserlängen, Faserorientierungsverteilungen sowie Porosität.
- Zerstörungsfreie 3D-Vermessung, insbesondere von Innenflächen z. B. Wandstärkenmessung
- Soll-/Ist-Vergleich von CAD-Daten mit CT-Messdaten und Duplizierung von Prüfobjekten mittels Rapid-Prototyping-Verfahren
- Generierung von Messdaten für die Simulation von Bauteilen

2. Ergebnisse

2.1 Charakterisierung von Kunststoffen mit Absorptions-Computertomografie

Die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung von Kunststoffen ist ein ideales Anwendungsfeld für CT, weil Kunststoffe eine eher geringe Röntgenabsorption haben und damit auch sehr große und dickwandige Bauteile noch gut durchstrahlt werden können. Aus den CT-Ergebnissen können wichtige Erkenntnisse über die Produktqualität und die dreidimensionale Struktur der Werkstoffkomponenten gewonnen werden. Die wichtigsten Anwendungsfelder in diesem Bereich sind:

- Charakterisierung der Faserstruktur von faserverstärkten Kunststoffen und Bestimmung der Faserorientierung bzw. des Faserorientierungstensors
- Detektion von Fehlern und Ungängen (Delamination, Ondulation, Porosität, gebrochene Fasern, etc.)
- Charakterisierung von Materialinhomogenitäten (Poren, Einschlüsse, Risse) und Materialübergängen, Bindenähte, Faserumlenkungen (Books), etc. . . .
- Dreidimensionale Charakterisierung der einzelnen Werkstoffkomponenten und Bestimmung von quantitativen Größen wie Geometrie, Position und Verteilungsfunktion der einzelnen Komponenten
- Qualität von Verbindungsstellen (z.B. Prüfung von Klebestellen)

Abbildung 2 zeigt CT-Schnittbilder von einem glas- (GFK) und einem kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff (CFK). Die Glasfasern in (a) haben einen Durchmesser von $\sim 13 \mu\text{m}$ und absorbieren die Röntgenstrahlung im Vergleich zur Polypropylen (PP)- Matrix auf Grund der höheren Dichte relativ stark. Im Gegensatz dazu wird für CFK (b) eine höhere Auflösung benötigt, um einzelne Kohlenstofffasern mit einem Durchmesser von $\sim 6 \mu\text{m}$ noch detektieren zu können. Der Dichte- bzw. Absorptionskontrast zwischen Kohlenstofffasern und Epoxidharz-Matrix bei CFK ist deutlich geringer als bei GFK. In (c) werden Poren und Reinharzbereiche im CFK gemeinsam mit einzelnen Kohlenstofffasern dreidimensional dargestellt.

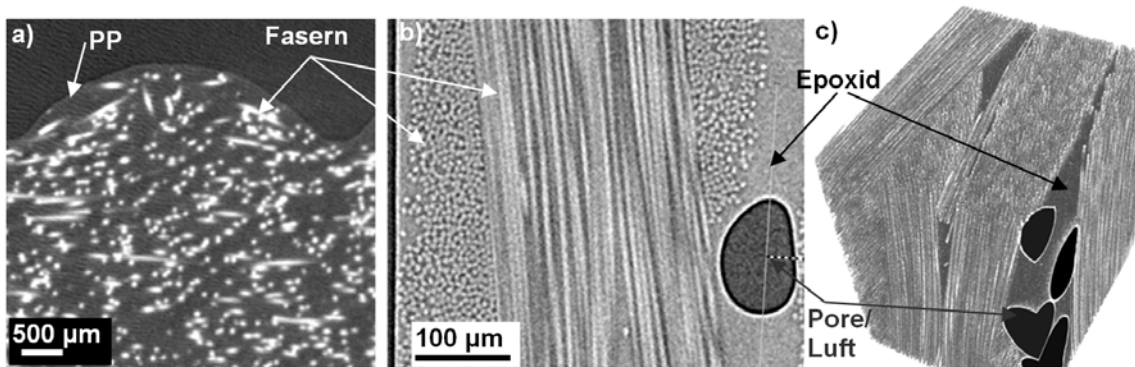


Abb.2: Faserdarstellung von: a) GFK tomografiert mit $(3 \mu\text{m})^3$, b) CFK tomografiert mit $1 \mu\text{m}$ und c) 3D-Darstellung eines CFK-Ausschnitts mit Porositäten.

Mittels CT wird eine komplette 3D-Information der Probe in digitaler Form generiert. Diese Daten können mittels verschiedenster Algorithmen ausgewertet werden, um quantitative Werte einer Probe oder eines Materials zu bestimmen. Dies wurde für glasfaserverstärkte Kunststoffproben durchgeführt. Details sind in [4] beschrieben. Bild 3 zeigt die aus den CT-Daten berechnete Faserlängenverteilung für glasfaser-verstärkte Polypropylenproben mit jeweils 10 Gew. % bis zu 60 Gew. % Faseranteil. Die Proben wurden als Granulat ($\sim 3 \times 3 \times 3$) mm³ mit einer Voxelgröße von $(2 \mu\text{m})^3$ tomografiert. Die ausgewertete Gesamtfaseranzahl hängt stark vom Fasergehalt ab und lag bei den verschiedenen Proben zwischen 3.000 und 100.000 Fasern. Im Vergleich zu Standardverfahren sind das sehr hohe Werte [4], da mit konventionellen Verfahren üblicherweise pro Probe nur einige hundert Fasern charakterisiert werden. Es sind deutliche Unterschiede in der Faserlängenverteilung für die unterschiedlichen Fasergehalte zu erkennen. Bei 60 gew. % Glasfasern liegt die mittlere Faserlänge bei $\sim 200 \mu\text{m}$, welche sich mit geringeren Glasfasergehalten zu höheren Faserlängen verschiebt. Für 10% Fasergehalt ist die mittlere Faserlänge etwa $550 \mu\text{m}$, also etwa das 2,5-fache der 60%-Probe. Aufgrund von Scherung und mechanischen Beanspruchungen kommt es beim Compoundieren zu einer deutlichen Reduktion der Faserlänge, es werden also viele Fasern gebrochen.

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) gewinnen in der Flugzeugindustrie immer mehr an Bedeutung. Begründet wird dieser Trend zum Leichtbau durch das deutlich bessere Verhältnis von Festigkeit und Steifigkeit zu der Materialdichte. Um jedoch diese Vorteile von CFK gegenüber den herkömmlichen Werkstoffen nutzen zu können, ist eine geringe Bauteilporosität unbedingt erforderlich. Um geringe Porositäten sicher zu stellen, werden die Bauteile in der Flugzeugindustrie standardmäßig mittels Ultraschallprüfung zerstörungsfrei geprüft. Anhand der Ultraschallabschwächung kann auf eine Bauteilporosität rückgeschlossen werden. Da die Ultraschallabschwächung jedoch nicht nur von der Bauteilporosität, sondern auch sehr stark von der Form und Verteilung der Poren, des verwendeten Harzsystems, sowie dem Vorhandensein von anderen Materialinhomogenitäten abhängt, liegt der Fehler in der Porositätsbestimmung mittels

Ultraschall bei 25 Prozent und darüber. Mittels Kegelstrahl Röntgen-Computertomografie kann man quantitativ die Porosität bestimmen. CT bietet den großen Vorteil, dass die Reproduzierbarkeit sehr gut ist und eine 3D-Information der Poren erfasst wird [5].

In Abbildung 4 werden in dem Diagramm (links) die quantitativen Porositätswerte von CFK-Proben ermittelt durch CT, den Werten aus den Standardverfahren in der Luftfahrt, der Ultraschallprüfung und der nasschemischen Analyse, gegenübergestellt. Mit allen Verfahren wurde derselbe Probenbereich ausgewertet. Aus dem Diagramm ist eine sehr gute Korrelation zwischen den verschiedenen Messverfahren ersichtlich. Bei den US-Werten ist die Streuung höher als bei den Werten aus der nasschemischen Analyse. Die Korrelation liegt ungefähr bei $R^2 = 0,98$. In den CT-Schnittbildauschnitten in Abbildung 5 (rechts) sind beispielhafte CT-Schnittbildauschnitte mit unterschiedlicher Porosität dargestellt. Anhand des Schnittbildes (a) können zusätzlich „höherdichte“ Verunreinigungen (hell) dargestellt werden [5].

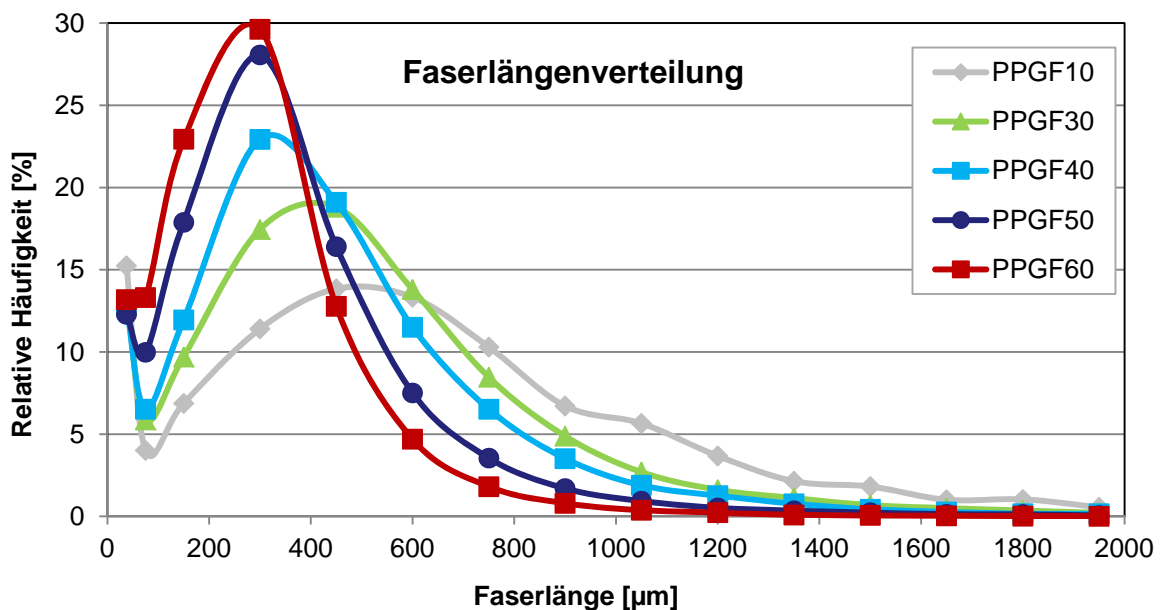


Abb.3: Aus den CT-Daten berechnete Faserlängenverteilung im Granulat von glasfaserverstärktem Polypropylen mit 10 % bis 60 % Glasfaseranteil.

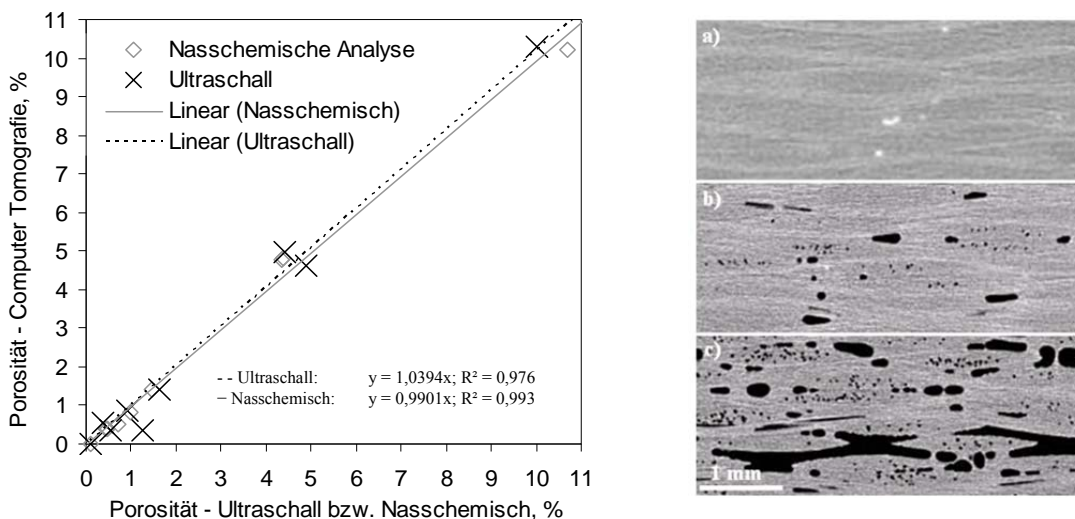


Abb.4: Porositätsbestimmung mittels CT gegenüber der Porositätsbestimmung mittels nasschemischer Analyse und Ultraschall (linkes Bild). CT-Schnittbilder 0 % (a), 0,9 % (b) und 4,5 % (c) Porosität. Voxelgröße = $(10 \mu\text{m})^3$ (rechtes Bild).

2.2 Charakterisierung von Leichtmetallen mit Absorptions-Computertomografie

Auch Leichtmetalle spielen im modernen Leichtbau eine große Rolle. Zu den Standardanwendungen von CT in der Aluminium- und Magnesiumindustrie gehört die Detektion von Poren und Lunkern. Abb. 5 zeigt die CT-Ergebnisse eines Aluminium-Druckgussteiles in einer semitransparenten Darstellung (links), wobei die detektierten Lunker und Poren farblich dargestellt werden können, und eine 3D-Darstellung der Oberfläche des Bauteils (rechts). Im Falle eines schlechten Gießprozesses kann es während der Abkühlphase an kritischen Stellen im Gussteil vermehrt zur Entstehung von Hohlräumen kommen, weil das von außen abkühlende Material ein Nachfließen zum Auffüllen der entstandenen Hohlräume verhindert. Bei entsprechender Voxelgröße und ausreichendem Dichteunterschied der Inhomogenität gegenüber der Matrix lassen sich nach einer CT-Untersuchung quantitative Gefüge- und Defektanalysen durchführen, wobei je nach Form (Sphärizität) der vorliegenden Defekte zwischen Erstarrungslunkern oder Gasporen bzw. Einschlüsse unterschieden werden kann.

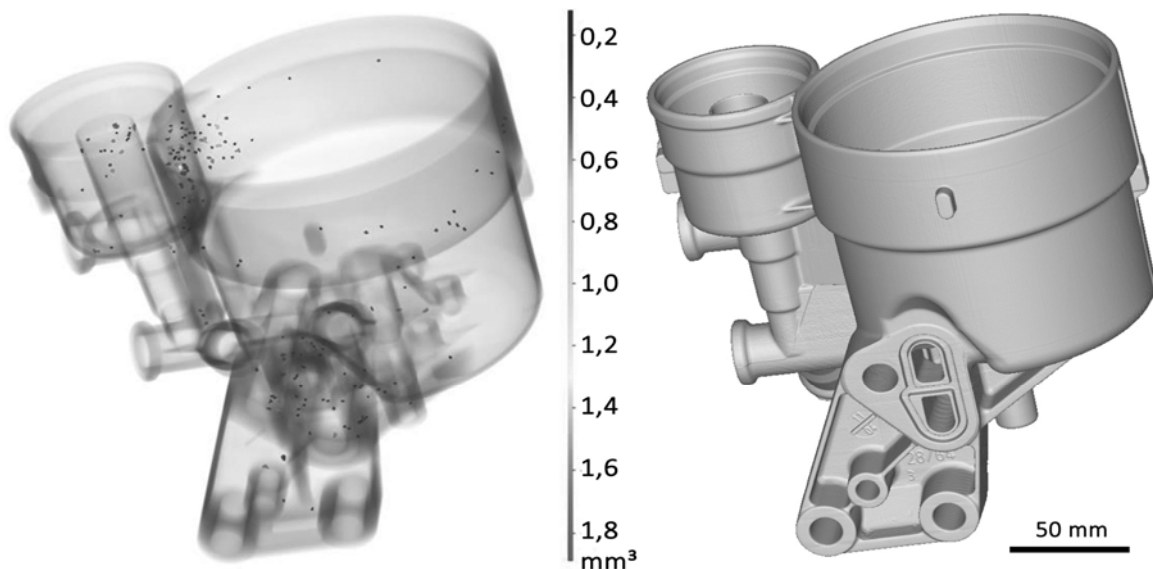


Abb.5: CT-Ergebnisse eines Aluminium-Druckgussfiltergehäuses mit einer farbkodierten Darstellung von Lunkern entsprechend deren Größe (automatische Defektanalyse) und Position in den CT-Daten, dargestellt in einer semi-transparenten (links) und gerenderten 3D-Darstellung (rechts). Voxelgröße = $(120 \mu\text{m})^3$

Abbildung 6 zeigt CT-Ergebnisse einer AlMg5Si7-Legierung. Vier unterschiedliche Phasen mit unterschiedlichen Röntgenabsorptionskoeffizienten sind detektierbar: die hochabsorbierenden Phasen sind AlFeSi-Aluminide (hell dargestellt), die Al-Matrix und Strukturen, die eine geringere Absorption als die Matrix haben und daher deutlich dunkler sind. Bei diesen Strukturen handelt es sich einerseits um Poren mit relativ glatten Oberflächen und andererseits um eutektische Phasen (Mg_2Si), die korallenartige Gefüge bilden [6]. Das rechte Bild in Abb. 7 zeigt eine 3D-Visualisierung eines ausgewählten Volumens der AlMg5Si7-Legierung. Hier wurden die eutektischen Mg_2Si -Partikel sowie die AlFeSi-Phasen segmentiert.

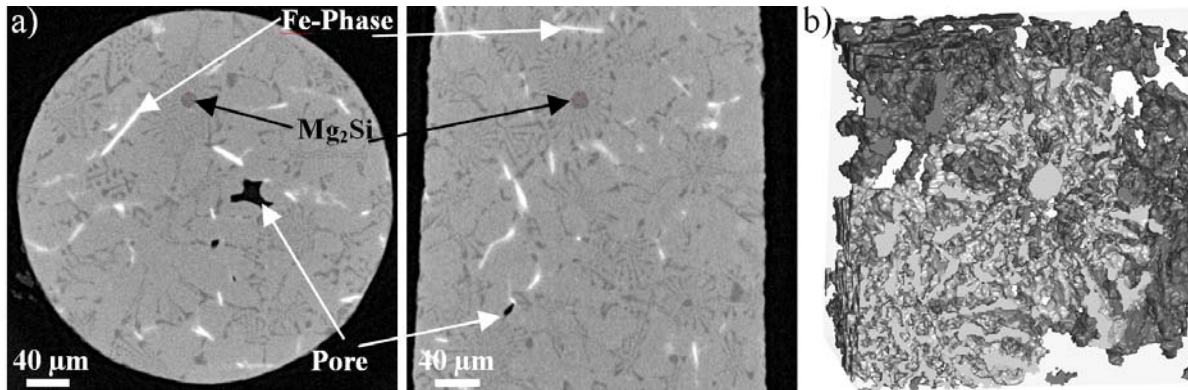


Abb.6: Heterogenitäten in einer AlMg5Si7 Legierung: a) orthogonale Schnittbilder b) 3D-Darstellung von Mg₂Si Phasen. Voxelgröße = (0,5 μm)³.

Als weiteres Beispiel werden CT-Ergebnisse einer Mg-Legierung (ZK60 - MgZn6Zr1 mit 2,5 % Gewichtsprozent Seltene Erden) präsentiert. Abbildung 7 zeigt ein hochauflösendes CT-Schnittbild einer gegossenen MgZn6Zr1-Legierung, die mit 2,5 Gew.% Seltene Erden modifiziert wurde. CT zeigt klar die dreidimensionale Struktur des Metalls. Die Mikrostruktur ist gekennzeichnet durch eine Matrix von globularen α-Mg Kristalliten, die durch ein stark verbundenes Netzwerk von intermetallischen Verbindungen entlang der Korngrenzen verstärkt wird [7]. Diese intermetallischen Legierungen entstehen durch Segregation von Zn und den Seltenen Erd-Elementen während der Verfestigung der flüssigen Phase. Der mittlere Durchmesser der Kristallite kann mit CT gemessen werden, er beträgt 150-200 μm. Es können zwei unterschiedliche Morphologien der intermetallischen Phasen unterschieden werden: eine mit glatter und eine mit lamellenartiger Struktur. Es kann eindeutig erkannt werden, dass die lamellenartigen Phasen eine höhere Dichte als die Phasen mit glatter Struktur haben. Die mit CT detektierbaren Phasen sind α-Mg, MgZn, MgMnZnSrZr und MgxREy intermetallische Verbindungen wie MgZnNbLaCe und MgZnCe.

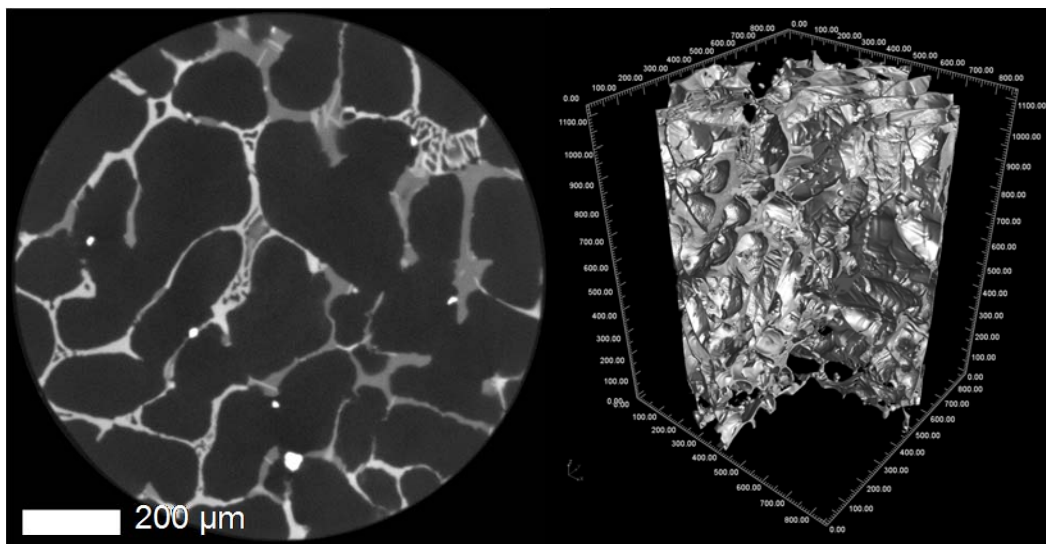


Abb.7: CT-Schnittbild (linkes Bild) und 3D-Visualisierung der intermetallischen Phasen (rechtes Bild) von ZK60+2.5Gewichts% Seltene Erden. Voxelgröße = (0,7 μm)³.

2.3 Phasenkontrast- und Gitterinterferometer Computertomografie

Talbot-Lau Gitter-Interferometer-Computertomografie (TLGI-CT) mit konventionellen Mikrofokusröntgenröhren und 3 Gittern (Phasengitter G0 zur Erzeugung von Kohärenz nach der Röntgenquelle, Phasengitter G1 nach der Probe und Absorptionsgitter G2 vor dem Detektor) ist in den letzten 10 Jahren eine essentielle und mächtige Methode in der Medizin, Biologie sowie Werkstoffcharakterisierung geworden [8-12]. Hierbei wird das G0-Gitter stufenweise bewegt, um Phaseninformation zu erhalten [8,9]. Das Messprinzip dieses TLGI-CT wird genutzt, um Röntgen-CT-Aufnahmen mit der Gitter-Phasenkontrast-Methode zu erstellen und um die folgenden drei Modalitäten auf einmal zu messen:

- 1) Absorption – Standard-CT: Die Gitter-Phasenkontrast-Methode liefert also auch das gewohnte Bild der herkömmlichen Röntgenbildgebung. Der physikalische Hintergrund dieser Bildinformation ist der Imaginärteil der komplexen Brechungsindizes der Materialien des zu vermessenden Objekts.
- 2) Brechung/Refraktion- Phasenkontrast-CT: Die differentielle Phasenverschiebung kann aus der Verschiebung des Talbot-Musters berechnet werden. Hiefür ist der Realteil der komplexen Brechungsindizes entlang der Strahlrichtung ausschlaggebend.
- 3) Kleinwinkelstreuung – Dunkelfeldkontrast-CT: Die Dunkelfeldinformation beruht auf der Kleinwinkelstreuung von Röntgenstrahlen in der Probe. Zur Beschreibung dieses Effektes kann der Streukoeffizient herangezogen werden.

Mit diesen prinzipiell voneinander unabhängigen Messmodalitäten ist es möglich, viel bessere Kontraste für eine Reihe von Anwendungsfälle zu erhalten, was zu besseren Segmentierungsergebnissen führen kann. In diesem Beitrag präsentieren wir Anwendungsfälle von TLGI-CT aus dem faserverstärkten Kunststoffbereich. Abbildung 8 zeigt Absorptions-CT-Schnittbilder einer hochauflösenden μ CT-Messung (a und b) der CFK-Probe P5, wobei in (b) der Kontrast zusätzlich erhöht wurde, um die einzelnen Faserbündel besser hervorzuheben. (c-e) zeigen TLGI-CT Bilder in den Messmodalitäten Absorption (c), Phasenkontrast (d) und Streukontrast (e). In den Absorptions- und Phasenbilder- (a-d) können vor allem die Poren im CFK aufgelöst werden. Bei Erhöhung des Kontrastes (b) können die Faserbündel in einer Richtung erahnt werden. Für eine Segmentierung ist dieser Kontrast nicht ausreichend. Mittels Streukontrast (e) in der TLGI-CT Messung entsteht ein sehr starkes Signal von den Kohlenstofffaserbündeln, welche im rechten Winkel zu den Gittern orientiert sind. Die Faserbündel sind damit mittels Streukontrast-CT viel besser detektierbar als mit den anderen Messmodalitäten.

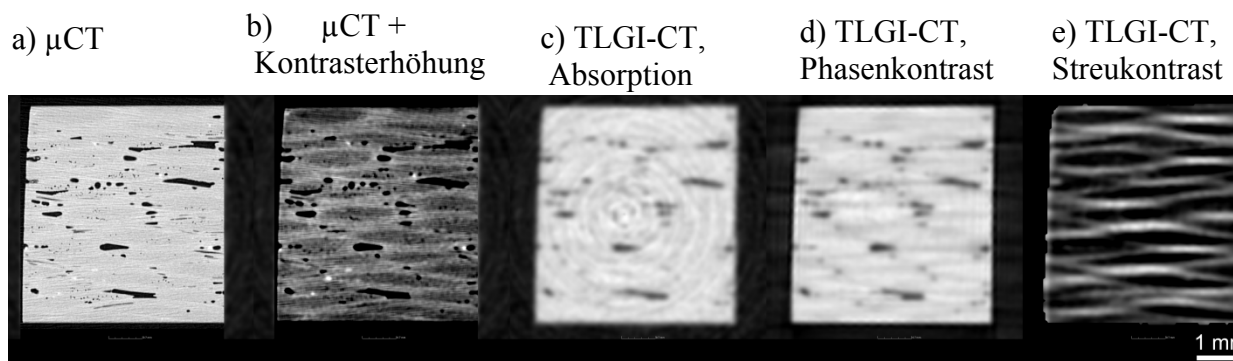


Abbildung 8: Vergleich einer hochauflösenden Absorptions-CT-Messung (a und b) der CFK Probe P5 mit den 3 Messmodalitäten Absorption (c), Phasenkontrast (d) und Streukontrast/Dunkelfeldkontrast (e) eines Talbot Lau-Gitterinterferometer-CT.

Wie bereits erwähnt, erhalten die Streukontrastdaten auch eine Richtungsinformation. Dies ist in Abb. 9 dargestellt, wo zwei aufeinander normal stehende Streukontrast-CT-Messungen präsentiert werden. Dazu werden die Proben einmal bei 0° (grün eingefärbt) und einmal bei 90° (rot eingefärbt) am Drehtisch positioniert und tomografiert. Durch Fusionieren der beiden Datensätze erhält man dadurch einen vollständigen Datensatz, in dem die Faserbündel in Abhängigkeit ihrer Orientierung farblich kodiert dargestellt werden können.

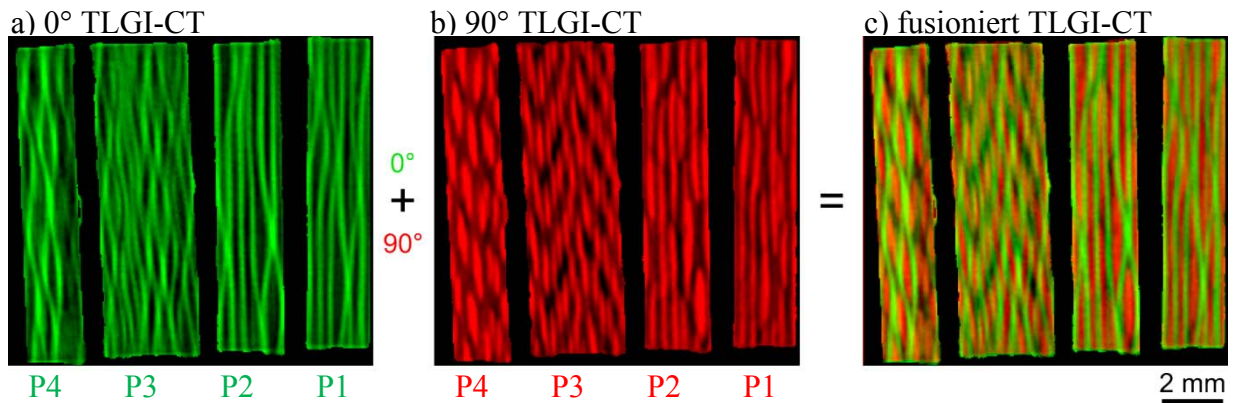


Abbildung 9: Fusion der Streukontrast-CT-Messungen mit $0^\circ/90^\circ$ Messanordnung (a und b) der CFK Proben P1-P4 zu einem kombinierten Datensatz (c). Die Farben grün und rot geben die Richtungen der Faserbündelorientierungen an (adaptiert von [9])

Abbildung 10 zeigt eine 3D-Darstellung der CFK-Probe P3 gemessen mit μ CT Absorptionskontrast (links) und mittels fusioniertem TLGI-CT Streukontrast (rechts) aus zwei Messungen. Anhand des fusionierten Streukontrastbildes lässt sich sehr gut der CFK-Aufbau „Plain Weave“ erkennen.

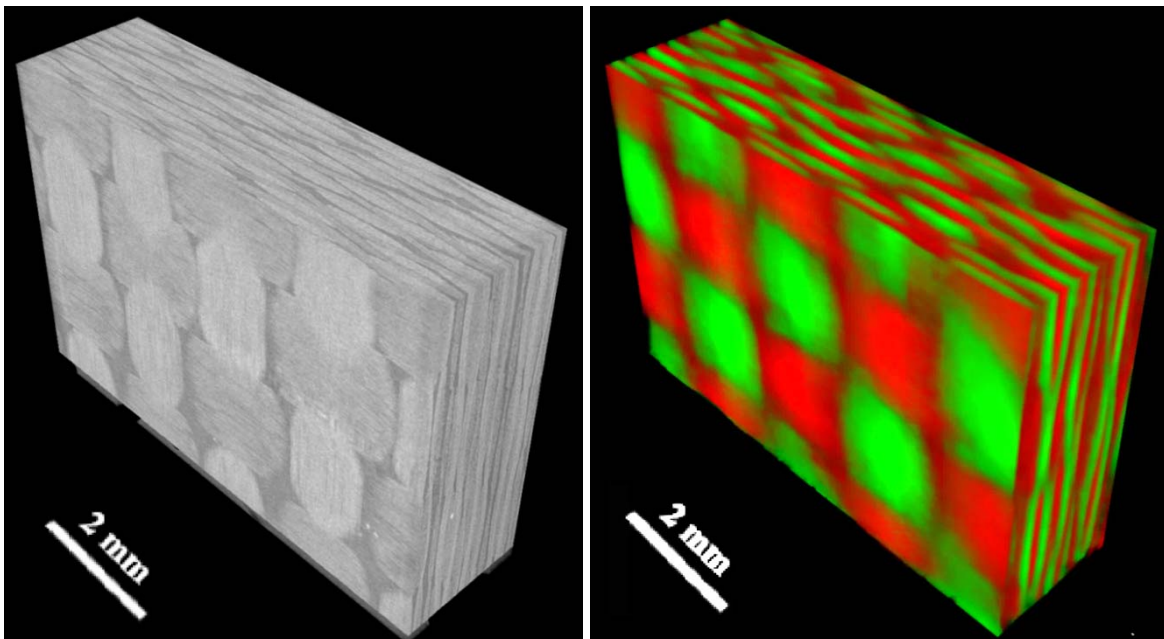


Abbildung 10: 3DCT-Bilder der CFK-Laminatprobe P3, gemessen mit Absorptionskontrast (links) und gemessen mit $0^\circ/90^\circ$ Streukontrast-CT (rechts) (Adaptiert von [9])

Danksagung

Dieses Projekt wurde unterstützt vom COMET-Programm der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) und der oberösterreichischen und steirischen Landesregierung im Rahmen von ZPT+ und vom Projekt “Multimodal and in-situ characterization of inhomogeneous materials” (MiCi) durch die oberösterreichische Landesregierung und die Europäische Union (EFRE) Im Rahmen des EU-Programms IWB2020.

Referenzen

- [1] J. Kastner (Editor): Proceedings Industrial CT-Conference, Wels, Austria, 19.-20. September 2012, ISBN 978-3-8322-9418-2, Shaker Verlag, Aachen, 2012. J. Kastner (Editor), Proceedings Industrial CT-Conference iCT2014, Wels, Austria, 25.-28. February 2014, ISBN-13: 978-3844025576, Shaker, Aachen (2014)
- [2] J. Kastner (Editor), Case Studies in nondestructive testing and evaluation vol6/ B, pp1-131, Special Issue 6th conference on industrial CT 2016 (iCT2016), Wels, Austria, 2016..
- [3] L. De Chiffre, S. Carmignato, J-P. Kruth, R. Schmitt and A. Weckenmann: Industrial applications of computed tomography. CIRP Annals-Manufacturing Technology 63, 655-677, 2014.
- [4] D. Salaberger, KA Kannappan, J. Kastner, J. Reussner, and T. Auinger: CT Data evaluation of fibre reinforced polymers to determine fibre length distribution. International Polymer Processing 3, 283-291, 2011.
- [5] J. Kastner, B. Plank, D. Salaberger and J. Sekelja: Defect and porosity de-termination of fibre reinforced polymers by X-ray computed tomography. In Proceedings 2nd International Symposium on NDT in Aerospace, 1-12, 2010.
- [6] J. Kastner, B. Harrer and H.P. Degischer: High resolution cone beam X-ray computed tomography for 3D-microstructure characterization of Al-alloys. Materials Characterization 62, 99-107, 2010.
- [7] S. Zauschirm: High-resolution X-ray computed tomography studies of com-pressed magnesium samples, Masterarbeit, Upper Austrian University of Applied Sciences, 2014.
- [8.] F. Pfeiffer, T. Weitkamp, O. Bunk, C. David, Phase retrieval and differential phase-contrast imaging with low-brilliance X-ray sources, Nat. Phys. 2, 258–261, 2006.
- [9] V. Revol, B. Plank, R. Kaufmann, J. Kastner, C. Kottler, A. Neels, Laminate fibre structure characterisation of carbon fibre-reinforced polymers by X-ray scatter dark field imaging with a grating interferometer, NDT E Int. 58, 64–71, 2013.
- [10] C. Hanneschläger, V. Revol, B. Plank, D. Salaberger, J. Kastner, Fibre structure characterisation of injection moulded short fibre-reinforced polymers by X-ray scatter dark field tomography, Case Studies in NDT & E Int. 3, 34-41 2015.
- [11] C. Gusenbauer, M. Reiter, B. Plank, S. Senck, C. Hanneschläger, S. Renner, R. Kaufmann, J. Kastner, Multi-modal Talbot-Lau grating interferometer data for the characterization of fibre reinforced polymers with metal components, 7th Conference on Industrial Computed Tomography (iCT2017), Leuven, Belgium, 2017
- [12] C. Gusenbauer, S. Hunger, S. Senck, J. Kastner, Characterization of Tooth Samples with a Talbot-Lau Grating Interferometer μ XCT Desktop Device, Proceedings of 4th International Conference on Image Formation in X-Ray Computed Tomography, Bamberg, Germany, 2016