

Röntgen-Topographie mit Klein- und Weitwinkel-Streuung und Röntgenrefraktions-Computertomographie

Jörg Schors, Manfred P. Hentschel, K.-Wolfram Harbich, Axel Lange, Bernd R. Müller
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Röntgen-Topographische Verfahren sind dadurch gekennzeichnet, dass die Streueigenschaften eines Probekörpers ortsaufgelöst erfasst werden. Somit vereinen sie die Vorteile der bildgebenden Eigenschaft der Radiographie mit der Strukturelektivität der Röntgenanalyse. Sowohl die Röntgen-Weitwinkel-Streuung als auch die Röntgen-Kleinwinkel-Streuung (-Beugung und -Refraktion) werden topographisch für die Materialcharakterisierung eingesetzt. Die Topographie-Verfahren und Untersuchungsbeispiele an modernen Werkstoffen (kohlefaserverstärkte Composite, Metall-Matrix-Composite) werden dargestellt. Daneben werden einige Beispiele für die Anwendung der Röntgenrefraktions-CT sowie ein Ausblick auf künftige Einsatzmöglichkeiten gegeben.

Stichworte: Röntgen-Streuung, Materialcharakterisierung, Composite, Keramik, Risse, Computertomographie

Streuung und Topographie

Röntgentopographische Verfahren bilden die Streueigenschaften eines Probekörpers ortsaufgelöst ab. Auf dem speziellen Gebiet der Einkristalle wird die Röntgen-Topographie seit vielen Jahrzehnten zur Darstellung von atomaren Versetzungsstrukturen verwendet [1]. Die Verfahren der Topographie waren bisher nicht auf polykristalline und nicht-kristalline Stoffe anwendbar. Durch die Entwicklung von Raster-Verfahren wurde diese Schwierigkeit beseitigt.

Die Aufgaben der zerstörungsfreien Materialcharakterisierung liegen in der Aufklärung und Nutzung der Korrelationen zwischen der Atomar-, Meso- und Mikrostruktur einerseits und den makroskopischen Eigenschaften von Werkstoffen und Komponenten andererseits. Aufgrund der unterschiedlichen Streueffekte überdeckt die Strukturelektivität der Röntgen-Topographie die sechs Größenordnungen von 10^{-2} bis 10^{-8} cm. Die durch Probenabtastung erreichbare Ortsauflösung kann einige Mikrometer erreichen,

so dass oft auch relevante Einzeldefekte im Sinne der traditionellen ZfP-Aufgaben erfasst werden können.

Die Kristallit-Dimensionen, die Grenzflächeneigenschaften und die Anisotropie von Materialien beeinflussen bei gegebener atomarer Struktur mitunter die mechanischen Eigenschaften von Werkstoffen sehr wesentlich. Die Verfahren der Röntgen-Topographie können zur Aufklärung dieser grundlegenden Zusammenhänge bei der Werkstoffentwicklung aber auch zur Qualitätssicherung und zur Mikrostruktur-Schadensanalyse beitragen.

Für die aus der Kristallographie bekannte Röntgenweit- und Kleinwinkel-Streuung dienen kommerzielle Röntgen-Feinstrukturanlagen, mit denen monochromatische Strahlung hoher Brillanz der Wellenlängen um 0,1 nm (d.h. einer Energie unterhalb 20 keV) erzeugt wird.

Die Weitwinkelstreuung (-beugung) bildet die atomare und molekulare kristalline Struktur unterhalb der Nanometer-Dimension durch elastische Beugung (ohne Wellenlängenänderung) ab [2]. Die Beugungsmuster von Kohlenstofffasern und Polymeren sind anisotrop, wodurch sie für die Bestimmung der Textur genutzt werden können. Die in Kompositen vielfach verwendeten Glasfasern zeigen, ihrer amorphen Molekularstruktur entsprechend, hier jedoch ein isotropes Streuverhalten. Da sich alle stofflich verschiedenen Festkörper auch durch ihr Röntgenbeugungs-Spektrum unterscheiden, ergibt sich damit eine Messsonde für die Ortsverteilung von Stoffen.

Die Röntgen-Kleinwinkel-Streuung dagegen ist ein klassisches Untersuchungsinstrument der Kolloidchemie und der Polymerphysik. Die Röntgen-Beugung an Partikeln bis etwa 50 nm Durchmesser kann mittels der Guinier- und der Porod-Analyse [3] verstanden werden. Oberhalb dieser Größenordnung dominieren jedoch zunehmend Brechungseffekte [4] (Refraktion). Unabhängig von dieser Unterscheidung sind die relativen Signaländerungen jedoch in gleicher Weise von der Elektronendichte und der inneren Ober-/Grenzfläche (spezifische Oberfläche) abhängig, so dass es bei einem Probekörper-Vergleich nicht wesentlich auf die Abgrenzung von Beugungs- und Brechungseffekten ankommt [5].

Die anisotropen Beugungsmuster einiger für polymere Verbundwerkstoffe typischen Verstärkungsfasern, C-Fasern, Glasfasern und Aramidfasern sind in Abb. 1 dargestellt. Die entsprechenden Faserrichtungen sind vertikal orientiert. Streudiagramme isotroper Strukturen - bekannt als Scherrer-Diagramme - sind jedoch rotationssymmetrisch.

Um derartige kristallographische Informationen ortsabhängig oder orientierungsselektiv abzubilden, ist es erforderlich, aus dem relevanten Streuwinkelbereich eine Fläche mittels einer Blende auszuwählen, hinter der ein Röntgendetektor die Intensität der gestreuten Strahlung aufnimmt. Je nach Anordnung ergeben sich die in Abb. 2 skizzierten topographischen Verfahren mit sehr unterschiedlichen Kontrasteigenschaften und Raumprojektionen.

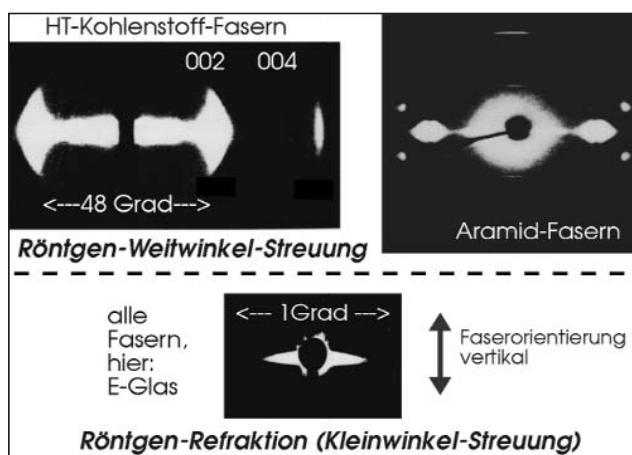


Abb. 1: Orientierte Röntgenstreuung typischer Verstärkungsfasern in Kompositen, C-Fasern, Glasfasern und Aramidfasern, Röntgen-Weit- und Röntgen-Kleinwinkel-Streuung

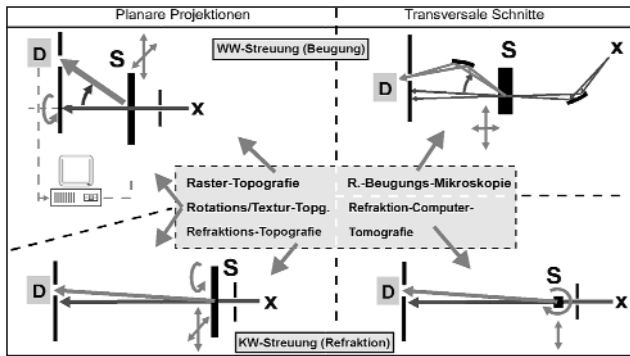


Abb. 2: Strahlgeometrien röntgentopographischer Verfahren: x Röntgen-Brennflack, P Probekörper, D Detektor (WW=Weitwinkel, KW=Kleinwinkel)

Den hier dargestellten Topographie-Verfahren ist gemeinsam, dass zunächst ein geeigneter Strahlengang gewählt wird und anschließend der Probekörper meist zweidimensional, einschließlich Drehbewegungen, verfahren wird. Angesichts der hohen Quanteneffizienz der verwendeten Szintillationsdetektoren ist der abgebildete „Einkanalbetrieb“ zumeist akzeptabel. Die Verfahrenszurückführung mittels Manipulatoren sowie das Auslesen der Zählraten der Detektoren für jede Position wird von einem PC bewältigt.

Topographie-Verfahren mittels Weitwinkelstreuung

Die Raster-Topographie nutzt die stoffspezifische Weitwinkelstreuung (Beugung) in definierte Streuwinkelbereiche. Wird ein Streuwinkel unter vorgewählter Orientierung (nach Abb. 2 links oben) festgelegt und eine flächige Probe senkrecht zur Einstrahlrichtung verfahren, so kann die Projektion der Verteilungsdichte dieser ausgewählten Phase vermessen und anschließend bildhaft dargestellt werden.

Abb. 3 zeigt die Faser-Bündelung zweier ausgewählter Orientierungen in einem gewickelten Rohr aus Kohlenstofffaser-Komposit (CFK), das insgesamt vier Vorzugsrichtungen enthält. Deutlich ist in der 45°-Wicklung (Abb. 3, mitte) die Doppelung jedes siebten Bündels als produktionstechnischer Fehler zu erkennen. Die Radiographie rechts enthält vergleichsweise wenig Information. Mittels Raster-Topographie wird die Stückprüfung in der Produktion durchgeführt [6].

Für die Röntgen-Rotations-Topographie wird entsprechend der Anordnung in Abb. 4 zwischen Probe und Detektorebene eine um die Primärstrahlachse drehbare Spaltblende installiert. Die Detektorebene wird durch einen großflächigen Röntgendetektor (Szintillationsdetektor mit Photomultiplier) ausgefüllt. An jeder Position der Probe wird die Spaltblende um 360° gedreht, so dass die vollständige Orientierungsinformation aufgenommen wird (in Abb. 2 oben links wird das analoge Vorgehen durch Probenrotation symbolisiert).

In Abb. 4, rechts sind oben die Rotationsprofile von Spritzgieß-Prüfkörpern dargestellt, links Polypropylen und rechts LCP (Liquid Crystal Polymer) Vectra 950 (HOECHST AG), einem hochkristallinen und sehr anisotropen Hochtemperatur-Thermoplast. Die entsprechenden Rotations-Topogramme rechts unten entstehen durch Wiederholung der Rotation bei linear bewegter Probe. Die horizontale Koordinate ist die Drehachse, die vertikale die Probenposition. Helle Grauwerte geben die relative Intensität der Polymer-Röntgenreflexe wieder. Die Breite der Orientierungsverteilung

ist ein relatives Maß für den Orientierungsgrad der Molekülketten des Polymer, die Schwerpunktlage für die mittlere Orientierung. Sie bestimmen Steifigkeit und Festigkeit des Materials [7].

In der Luft- und Raumfahrt-Technik werden Kohlefaser-Komposit-Lamine (CFK-Lamine) verwendet, die aus mehreren Schichten mit Kohlefasern unterschiedlicher Richtung aufgebaut sind. Bei der Herstellung von Satelliten-Reflektoren ist die genaue Einhaltung der Faserrichtung für die Formstabilität entscheidend. Für den 3,5 Meter-Reflektor des geplanten Europäischen Satelliten FIRST (Far Infra Red Submillimeter Telescope) - den bisher größten Satelliten-Reflektor - besteht die extrem hohe Anforderung an die Faserwinkel-Toleranz von weniger als 0,1°, um Formstabilität und damit die genaue optische Abbildung kosmischer Objekte zu gewährleisten.

Die Röntgen-Weitwinkel-Topographie ermöglicht die geforderte präzise und vor allem zerstörungsfreie Bestimmung der Faserorientierung in CFK. Im Auftrag der ESA und in Zusammenarbeit mit der DASA, Dornier Satellitensysteme GmbH, wurde systematisch die Orientierung von Hochmodul-Kohlenstoff-Fasern in den Deck-Laminen eines Reflektor-Sandwich vermessen. Die hohle Doppelschicht besteht aus zwei 0,6 mm dicken CFK-Laminen, die durch 2 cm hohe CFK-Waben verbunden sind.

Parallel ausgerichtete Kohlenstoff-Fasern erzeugen die in Abb. 4 dargestellten zwei abgelenkten Strahlenbündel, die auf einem Röntgenfilm als „Reflexe“ abgebildet werden. Dem entsprechend ergeben sechs Faserrichtungen in zwei

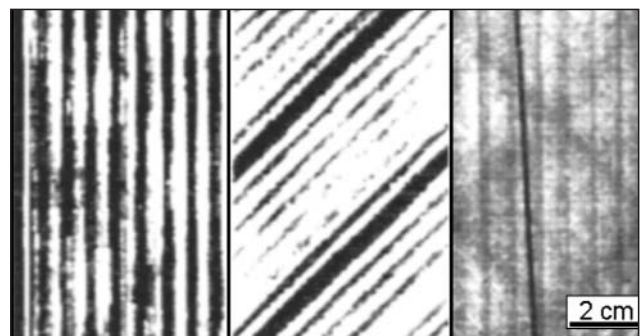


Abb. 3: Röntgen-Raster-Topogramme der Kohlenstofffaser-Bündelung zweier ausgewählter Orientierungen in einem gewickelten CFK-Rohr mit insgesamt vier Faser-Vorzugsrichtungen in 8 Lagen; rechts das Weichstrahlungsradiogramm zum Vergleich

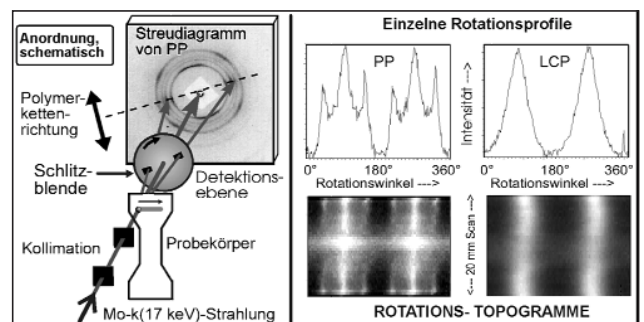


Abb. 4: Rotationstopographie der molekularen Orientierung. Links: Um den Primärstrahl drehbare Spaltblende zwischen Probe und Detektorebene; rechts oben Rotationsprofile von Spritzgieß-Prüfkörpern PP und LCP Vectra 950, unten rechts Rotations-Topogramme

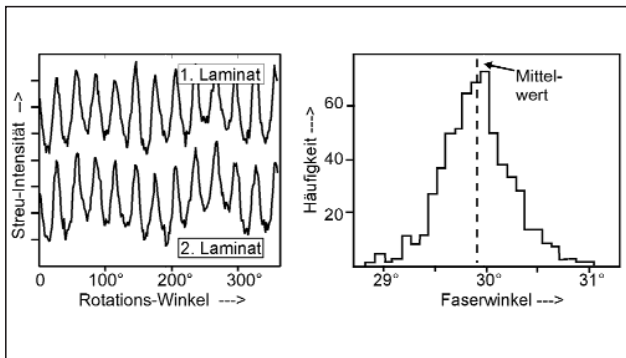


Abb. 5: Rotations-Profil der 12 C-Faser-Reflexe von 2 Laminaten eines CFK-Sandwich mit 20 mm Abstand (links) und Faserwinkel-Histogramm einer ausgewählten Faserrichtung aus 840 Rotationsprofilen auf 80 cm²

Laminatschichten im Waben-Abstand (20 mm) jeweils 12 Reflexe auf zwei Ringen (Abb. 5). Aus der Winkelverteilung der Reflexe ergeben sich dann die Faser-Richtungen an einer einzelnen Probenposition. Das isotrop und diffus streuende Epoxid der Matrix beeinflusst die orientierte Faser-Streuung nur unwesentlich.

Die präzise Orientierung der 12 Faser-Reflexe eines Laminats wird innerhalb weniger Sekunden pro Position durch Rotations-Profile vermessen und auf einem PC durch Kurven-Anpassung (mit verallgemeinerten Lorenz-Profilen) bestimmt. Durch flächige Abtastung des Probekörpers bei Rotation der Spaltblende an jeder Prüf-Position wird das Reflektor-Material innerhalb weniger Stunden charakterisiert.

Beispielhaft für eine Faserrichtung zeigt Abb. 5 (rechts) die Häufigkeit der ermittelten Faserwinkel an 840 Positionen auf 80 cm² Laminatfläche. Der für die Formstabilität des Satelliten-Reflektors entscheidende Mittelwert weicht hier vom Sollwert um 0,11° ab. Die mittlere Faserorientierung wird mit einer Genauigkeit von ±0,03° bestimmt, wesentlich präziser als erforderlich. Auf diese Weise kann quantitativ die spezifische Qualität der CFK-Reflektoren in der noch laufenden Entwicklung optimiert werden und der Auftraggeber seine Material-Spezifikation noch vor dem Satellitenstart verifizieren, um das Risiko von optischen Abbildungsfehlern des Reflektors zu verringern.

Statt einer vollständigen Rotation der Blende an jedem Messpunkt können durch orts aufgelöste Abtastung bei fester Blendenposition relative Änderungen in Faser-Orientierung, -Masse und -Sorte mit deutlich geringerer Messzeit erfasst und dargestellt werden. Dazu werden drei geeignete Winkelpositionen A, B und C um den Textur-Reflex der Fasern gewählt und die derart gemessenen Topogramme miteinander verrechnet, die dann die gewünschte Information liefern. In Abbildung 6 sind die für ein unidirektional mit Kohlefasern verstärktes Laminat gemessenen relativen Änderungen in Orientierung, Masse und Sorte (Reflexbreite) dargestellt.

Damit lassen sich die möglichen Untersuchungen mittels Weitwinkel-Topographie an CFK-Laminaten und Sandwich-Strukturen wie folgt zusammenfassen:

- Simultane Orientierungsbestimmung in mehrlagigen Kompositen für bis zu sechs Faserhauptrichtungen mit einer Genauigkeit von 0,1°

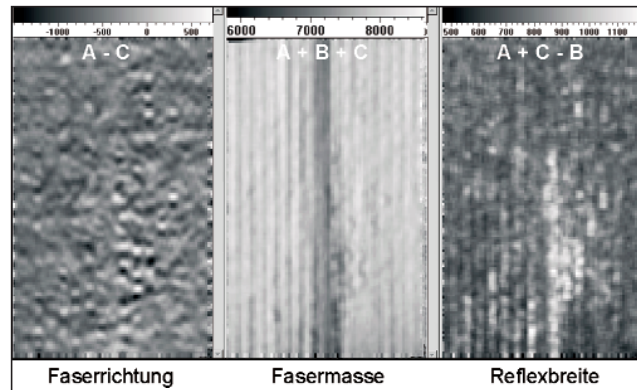


Abb. 6: Relative Änderungen von Faser-Richtung, -Masse und -Sorte (Reflexbreite) in einem UD-Laminat (10400 Messpunkte, Probengröße 105 mm x 250 mm)

- Statistik der Faserorientierung und der Fasermasse für Flächen bis zu 300 mm x 300 mm
- Sichere Bestimmung der Fasersorte in mehrlagigen Kompositen auch bei partieller Überlagerung der Texturreflexe
- Schnelle Messung der relativen Änderungen von Fasermasse, -orientierung und -sorte durch Textur-Topographie oder Präzisionsmessungen mittels Rotations-Topographie mit einer Ortsauflösung bis zu 200 µm je Richtung
- Bestimmung der Häufigkeitsverteilung des integralen (alle Faserrichtungen) und differentiellen (je Faserrichtung) Fasergehaltes

Topographie und Tomographie mittels Kleinwinkelstreuung

Die kennzeichnende Wechselwirkung der Röntgen-Refraktions-Topographie beruht auf der Ablenkung der Röntgenstrahlen an inneren Grenzflächen verschiedener Brechungsindizes, in Analogie zum bekannten Brechungseffekt des sichtbaren Lichts an Prismen und Linsen.

Mittels einer kommerziellen Kleinwinkelstreuammer nach Kratky kann entsprechend dem in Abb. 2 unten links dargestellten Diagramm die innere Ober- bzw. Grenzflächendichte dargestellt werden [10]. Das erfolgt ortsauflösend, indem der Probekörper wiederum flächig verfahren wird.

Abb. 7 zeigt eine Serie von Schlagschäden in einem CFK-Laminat. Die sehr begrenzten Schädigungszonen sind charakterisiert durch Matrix-Risse und Faser-Matrix-Enthftung. Der Schriftzug BAM demonstriert die Wirkung der großen spezifischen Oberfläche von Graphit im Bleistift-



Abb. 7: Schlagschaden-Reihe in einem CFK-Laminat (Matrix-Risse und Faser-Enthftung). Der Bleistift-Schriftzug „BAM“ demonstriert die große spezifische Oberfläche von Graphit

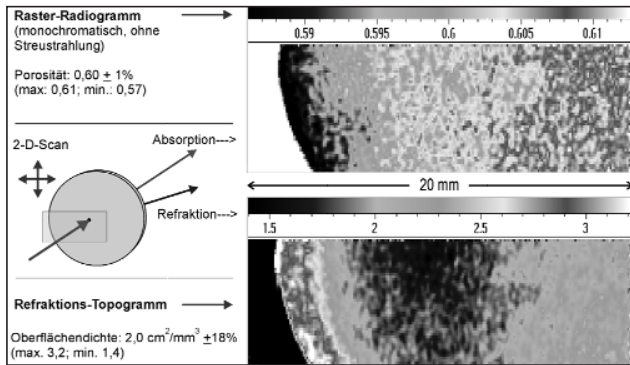


Abb. 8: Raster-Radiogramm und Refraktions-Topogramm einer SiC-Keramik

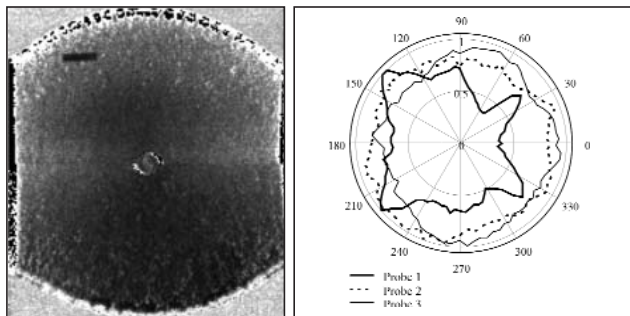


Abb. 9: Porengrößenverteilung einer 3 mm dicken Sandwich-Platte aus Polypropylen mit Schaumkern (links, Probe 1, 165 mm x 225 mm) und korrespondierendes Polardiagramm der relativen Porengrößen (rechts). Die Porengrößen in Proben 2 und 3 sind zufällig verteilt, während Probe 1 eine Vorzugsrichtung in der Größenverteilung besitzt

strich. Die Refraktions-Topographie ist für jegliche zerstörungsfreie quantitative Charakterisierung von Rissdichte, Rissorientierung oder Porendichte-Verteilungen in Werkstoffen geringer Dichte geeignet.

In einem weiteren Beispiel der Röntgen-Refraktions-Topographie wird eine SiC-Keramik-Scheibe charakterisiert. In Abb. 8, oben, ist der Logarithmus der Transmissions-Intensität als Raster-Radiogramm dargestellt. Es zeigt direkt die lokale Porositäts-Verteilung. Eine derartig hohe quantitative Kontrastierung von Dichte-Unterschieden ist im Gegensatz zur klassischen Radiographie mit Bremsstrahlung nur durch die Verwendung monochromatischer Strahlung (MoK_{α}) möglich.

Im unteren Teil der Abb. 8 ist die Oberflächen-Dichte (mittlere Porenoberfläche pro Volumen-Einheit) wiedergegeben. Diese ist unabhängig von der lokalen Dichte. Sie wird direkt ermittelt, indem die Streuintensitäten an jeder Position mit der Transmissionsintensität normalisiert werden. Der Vergleich zeigt weitgehend eine lokale Antikorrelation von Porosität und innerer Oberfläche (d.h. große innere Oberfläche bei kleiner Porosität und umgekehrt), was nur durch sehr unterschiedliche Poren-Größen verständlich wird.

Ähnliche Untersuchungen wurden auch an Sandwich-Platten aus Polypropylen und einem geschäumten Innenkern durchgeführt (Abb. 9). Die Abmessungen der Platten betragen 165 x 225 mm. Der Anguss befand sich zentral in der Platte (in Abb. 9 deutlich erkennbar), so dass im we-

sentlichen eine radialsymmetrische Porenverteilung zu erwarten wäre.

Durch unterschiedliche Prozessführung und Prozessparameter während der Herstellung ergaben sich unterschiedliche Porengrößenverteilungen, die mit Hilfe der Rotations-Topographie nachgewiesen werden konnten. Der Vergleich mit verschiedenen modellierten Verteilungsfunktionen liefert dann Informationen über den Verteilungstyp und erlaubt im Zusammenhang mit den Herstellungsparametern eine gezielte Prozessführung.

Obwohl die Röntgen-Refraktions-Topographie über einen Grenzflächen-Kontrast für Nanometer-Dimensionen verfügt, werden Details als Projektion überlagert. Das Verfahren kann jedoch nach Abb. 2, unten rechts, zur Röntgen-Refraktions-Computer-Tomographie erweitert werden, indem der Probekörper um eine zum Primärstrahl senkrechte Achse gedreht wird, um aus Linearprofilen ein transversales Schnittbild zu rekonstruieren. Wird der Streuwinkel auf Null gestellt und die Probe unter jedem Drehwinkel jeweils vertikal verfahren, ergibt die sogenannte „gefilterte Rückprojektion“ der Absorptionssignale ein Schnittbild der konventionellen Röntgen-Computer-Tomographie (CT).

Die gleiche Prozedur ergibt mit den Streusignalen (unter etwa zwei Bogenminuten) durchgeführt, einen völlig andersartigen Kontrast, der vor allem durch die Grenzflächen und Oberflächen des Probekörper verursacht wird (Abb. 10, links unten). Gerade die schon vorhandenen und durch mechanische Belastung noch verstärkten inneren Oberflächen sind ausschließlich in der Refraktions-CT erkennbar.

Neben den Grenzflächen zwischen Matrix und Kohlefaser-Insert sind zusätzlich Risse innerhalb des Inserts (Kohlefaser-Komposit) und Bruchflächen sehr gut erkennbar. Das Refraktions-Computer-Tomogramm hat etwa 100 μ m Ortsauflösung. Die Messzeit beträgt ca. 8 Stunden.

Seit 2000 betreibt die BAM bei BESSY einen Röntgenmessplatz (BAMline) für die Materialcharakterisierung. An diesem Messplatz steht monochromatische Röntgenstrahlung

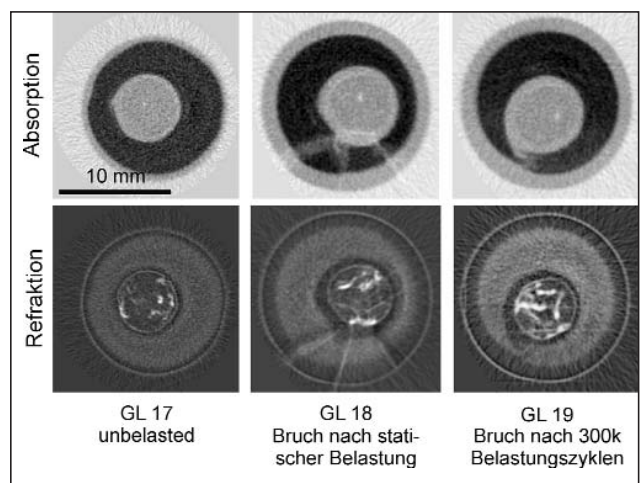


Abb.: 10: Konventionelle (oben) und Refraktions-CT (unten) an einem komplexen zylindrischen Hybrid-Bauteil aus Polyamid 12 (teilweise kurzglasfaserverstärkt) mit Innenteil aus Kohlefaser-Stab vor und nach mechanischer Belastung bis zum Bruch. Projektions-ebene nahe der Bruchstelle (Außendurchmesser: GL17: 15 mm, GL18 und GL19: 17,5 mm)

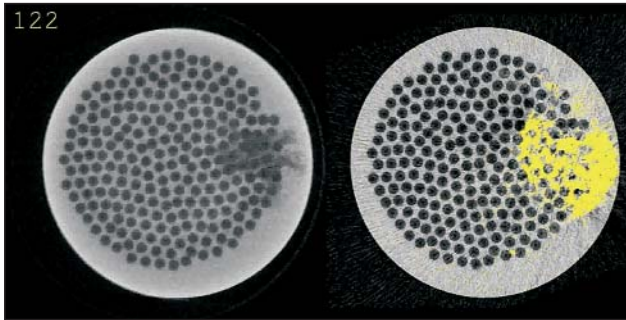


Abb. 11: Links: Rekonstruktion aus einer Absorptions-CT-Messung. 100 keV, $4,7 \times 4,7 \times 4,7 \mu\text{m}^3$ Voxel. Rechts: Rekonstruktion aus der Refraktionsmessung. 50 keV, $5,3 \times 5,3 \times 5,3 \mu\text{m}^3$ Voxel. Die Probe befindet sich zwischen zwei Si(111)-Kristallen

in einem parallelen, oder je nach Bedarf auch fokussierten Strahlenbündel für die Materialcharakterisierung mit einer Photonenenergie von 5 keV bis zu 100 keV mit ausreichendem Photonenfluss zur Verfügung. Die Photonenenergie und Strahlgeometrie können durch den in die BAMline integrierten Doppel-Kristall- bzw. Doppel-Multilayer-Monochromator eingestellt werden. Der Messplatz besteht aus einem 6-Kreis-Goniometer, das eine exakte und reproduzierbare Positionierung der Kristalle und der CCD-Kamera gewährleistet sowie einem CT-Manipulatorsystem für die Probenbewegung.

Bei der Refraktions-CT befindet sich die Probe zwischen zwei Si-Kristallen, die für die gewählte Photonenenergie die Bragg-Bedingung erfüllen. Der erste Kristall monochromatisiert und kollimiert den Primärstrahl, während der zweite Kristall ausschließlich die Strahlung auf die CCD-Kamera reflektiert, die in ihrer Ausbreitungsrichtung nicht mehr als ± 1 Bogensekunde vom Primärstrahl abweicht. Sämtliche Strahlung, die durch die innere Struktur der Probe eine Ablenkung von mehr als einer Bogensekunde erfährt, gelangt durch die selektive Wirkung des zweiten Kristalls nicht mehr zur CCD-Kamera. Diese fehlende Intensität wird bei der Datenauswertung als zusätzliche Absorption durch die Probe interpretiert und bei der Rekonstruktion durch helle Bildpunkte dargestellt (hohe Dichte).

Abb. 11, links, zeigt die Rekonstruktion einer von 300 Ebenen einer Absorptions-CT-Messung (Labor CT-Anlage, 100 keV, $4,7 \times 4,7 \times 4,7 \mu\text{m}^3$ Voxel). Es zeigt den Querschnitt einer zylindrischen LCF-Probe (LCF=low cycle fatigue). Sie besteht aus einem mit SiC-Fasern verstärkten Titan-Komposit. Die Verstärkungsfasern sind als dunkle Scheiben mit einem etwas dunkleren Kern (Kohlenstoff) zu erkennen. Die Fasern haben einen Durchmesser von $140 \mu\text{m}$ und sind exzentrisch zur Rotationsachse der Probe angeordnet. Auf der rechten Seite ist deutlich ein Riss im Matrixmaterial zu erkennen (dunkler Bereich). Einzelne Faserrisse können nicht nachgewiesen werden.

Abbildung 11, rechts, zeigt die Rekonstruktion einer Ebene aus einer Röntgen-Refraktions-CT-Messung (50 keV, $5,3 \times 5,3 \times 5,3 \mu\text{m}^3$ Voxel) an derselben Probe. Die Absorptioninformation ist die gleiche wie in Abb. 11, links. Jedoch zeigt der Refraktionseffekt einen deutlich größeren Rissbereich in der Matrix (vergleiche dunklen Bereich in Abb. 11, links, mit dem gelben Bereich in Abb. 11, rechts, sowie einzelne Faser-Matrix-Ablösungen und Faserrisse, die in der Absorptionsmessung nicht zu erkennen sind).

Ausblick

Die dargestellten Röntgen-Topographie-Verfahren sind naturgemäß zur Charakterisierung von Mikro- und Nanostrukturen unterschiedlicher Werkstoffe und Bauteile geeignet. Vorzugsweise sind hier wegen der relativ weichen Strahlung, typisch unter 20 keV, jedoch dünnwandige Leichtbauwerkstoffe besonders geeignet. Der größte Bedarf an topographischen Untersuchungen hat sich bisher im Bereich der Entwicklung und Schadens-Analyse von Kunststoffen, Verbundwerkstoffen, Keramiken und Schäumen aller Art entwickelt. Darüber hinaus hat sich für Untersuchungen von Leichtmetallen neuerdings Synchrotron-Strahlung mit Energien zwischen 40 und 60 keV als geeignet erwiesen. Das Potential der Refraktions-Topographie und -Tomographie ist derzeit noch nicht vollständig ausgeschöpft.

Literatur

- Lang, A. R.: Topography, X-ray diffraction, in: G.L. Clark (Ed): The Encyclopedia of X-rays and Gamma Rays, Reinhold Publishing Corporation, New York 1963, S. 1053
- Glocker, R: Materialprüfung mit Röntgenstrahlen, Springer-Verlag, Berlin, Göttingen. Heidelberg, 1949
- Porod, G.: Die Röntgenkleinwinkelstreuung von dichtgepackten kolloidalen Systemen, I.Teil, Kolloid-Z. 124 (1951) S. 83-114
- Hentschel, M.P.; Hosemann, R.; Lange, A.; Uther, B.; Brückner, R.: Röntgen- Kleinwinkel-Brechung an Metalldrähten, Glasfäden und hartelastischem Polypropylen. Acta Cryst. A 43 (1987) S. 506-513
- Hentschel, M.P.; Harbich, K.-W.; Lange, A.: Nondestructive evaluation of single fibre debonding by X-ray refraction. NDT & E international 27 (1994) S. 275-280
- Hentschel, M.P Kempf, G.; Lange A.: Röntgen-Rückstreu-Topometrie. Materialprüfung 32 (1990) S. 267-269
- Hentschel, M.P.; Lange, A.; Harbich, K.-W.; Ekenhorst, D.; Schors, J.: Röntgentopographie der Faser und Polymerorientierung. Materialprüfung 39 (1997) S. 121-123
- Harbich, K.-W.; Hentschel, M.P.; Lange A.: Making Carbon Fibres in Composites Visible: Kunststoffe/German Plastics 83 (1993) 9, S. 22-23
- Stephenson, J.D.; Hentschel, M.P.; Lange, A.: Synchrotron radiation (hard) X-ray diffraction microscopy of carbon fibre reinforced plastic (CFRP). Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. B 88, (1994) S. 287-292
- Harbich, K.W.; Hentschel, M.P.: Charakterisierung von Hochleistungsverbundwerkstoffen mittels Röntgen Refraktion. GIT Fachzeitschrift für das Laboratorium 38 (1994), S. 1324-1329