

*E. Zschech, M. Löffler, P. Krüger, J. Gluch, K. Kutukova, I. Zgłobicka, J. Silomon,
R. Rosenkranz, Y. Standke, E. Topal*

Laboratory Computed X-Ray Tomography – A Nondestructive Technique for 3D Microstructure Analysis of Materials

Röntgen-Computertomographie im Labor – ein zerstörungsfreies Verfahren für die 3D-Gefügeanalyse von Materialien

*Received: May 25, 2018
Accepted: May 29, 2018*

*Eingegangen: 25. Mai 2018
Angenommen: 29. Mai 2018
Übersetzung: E. Engert*

Introduction

X-ray imaging and X-ray computed tomography (XCT) provide non-destructive characterization capabilities on opaque objects across a range of length scales, observing features with sizes spanning from millimeters to micrometers down to several 10 nanometers. Currently, two types of laboratory-based XCT setups are available commercially for imaging at medium and high resolution: micro XCT in projection geometry with a resolution of about 1 μm and nano XCT with focusing X-ray lenses

Einleitung

Röntgenbildgebung und Röntgen-Computertomographie (XCT) bieten Möglichkeiten der zerstörungsfreien Charakterisierung von lichtundurchlässigen Objekten in einem großen Längenskalenbereich. Dabei ist die Betrachtung von Merkmalen im Millimetermaßstab über den Mikrometerbereich bis hin zu einer Größe von einigen 10 Nanometern möglich. Derzeit sind für die Bildgebung bei mittlerer und hoher Auflösung zwei verschiedene XCT-Laborgeräte kommerziell erhältlich: Mikro-XCT in der Projektionsgeometrie mit

Authors:

Ehrenfried Zschech, Peter Krüger, Jürgen Gluch, Kristina Kutukova, Jendrik Silomon, Rüdiger Rosenkranz, Yvonne Standke Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems Dresden, Maria-Reiche-Strasse 2, 01109 Dresden, Germany; e-mail: ehrenfried.zschech@ikts.fraunhofer.de

Markus Löffler, Emre Topal Dresden University of Technology, Dresden Center for Nanoanalysis, 01062 Dresden, Germany

Izabela Zgłobicka Warsaw University of Technology, ul. Woloska 141, 02–507 Warszawa, Poland

with a resolution down to about 100 nm [1]. These XCT techniques are used for two- or three-dimensional inspection of medium and small sized objects, as well as object interiors and materials' microstructure components. Because of their ability to reveal structural characteristics, materials' microstructure and flaws, such as cracks and pores, or local composition and density differences, they are potential techniques for imaging of micro- und nano-structured objects (e.g. microelectronics products [2–4]), advanced multi-component materials (e.g. composites and porous or skeleton materials [5, 6]) as well as biological objects (e.g. pollens and diatoms [7, 8]). The ability to generate three-dimensional (3D) images of geometrically complex parts enables to compare manufactured parts with their CAD data.

In this paper, potential and limits of micro XCT and nano XCT for nondestructive 3D imaging of materials and biological objects are described, including challenges of sample preparation for X-ray microscopy and nano XCT. Applications for nondestructive evaluation of geometrical features, materials' microstructure and flaws are discussed. It is shown that laboratory-based X-ray imaging techniques with several resolution ranges have a huge potential for materials science and engineering. Current developments are described and perspectives of the techniques are provided.

1. Micro and Nano X-ray Tomography

A multi-scale approach, i.e. using 3D imaging techniques with several resolution ranges, is often preferred for the study of the microstructure of materials and of biological

einer Auflösung von etwa 1 μm und Nano-XCT mit fokussierenden Röntgenlinsen mit einer Auflösung bis etwa 100 nm [1]. Diese XCT-Techniken kommen in der zwei- oder dreidimensionale Betrachtung von Objekten mittlerer und kleiner Größe sowie des Objektinneren und von Werkstoffgefügebestandteilen zum Einsatz. Da durch diese Verfahren Strukturmerkmale, das Werkstoffgefüge und Werkstofffehler wie Risse und Poren, oder die lokale Zusammensetzung und Dichteunterschiede offenbart werden können, kommen sie potenziell für die Abbildung von mikro- und nanostrukturierten Objekten (z.B. Mikroelektronikprodukte [2–4]), modernen Mehrkomponentenwerkstoffen (z.B. Verbundwerkstoffe und poröse oder Skelettmaterialien [5, 6]) sowie biologischen Objekten (z.B. Pollen und Diatomeen [7, 8]) in Frage. Durch die Möglichkeit der Erzeugung dreidimensionaler (3D) Bilder geometrisch komplexer Teile können gefertigte Teile mit den entsprechenden CAD-Daten verglichen werden.

In dieser Arbeit werden Möglichkeiten und Grenzen der Mikro-XCT und Nano-XCT für die zerstörungsfreie 3D-Bildgebung von Werkstoffen und biologischen Objekten beschrieben und dabei auch Herausforderungen der Probenpräparation für Röntgenmikroskopie und Nano-XCT aufgezeigt. Es werden Anwendungen für die zerstörungsfreie Prüfung geometrischer Merkmale, des Werkstoffgefüges und von Materialfehlern diskutiert. Es wird aufgezeigt, dass Labor-Röntgenbildgebungstechniken mit mehreren Auflösungsbereichen großes Potenzial für Werkstoffwissenschaft und -technik besitzen. Für diese Techniken werden aktuelle Entwicklungen beschrieben und Perspektiven aufgezeigt.

1. Mikro- und Nano-Röntgentomographie

Ein Multiskalenansatz, d. h. der Einsatz von 3D-Bildgebungsverfahren mit unterschiedlichen Auflösungsbereichen, wird aufgrund der sich ergänzenden Informationen der

objects because of the complementary information of the individual characterization techniques [9, 10]. The choice of the imaging technique(s) depends on the sample volume that needs to be characterized and the resolution required to image the relevant features in a statistically relevant sample volume. In the case of XCT, the chemical composition of the sample and the X-ray attenuation lengths have to be considered too, and the photon energy has to be selected accordingly. That means, the choice of the tomography technique is application-specific and it depends on the object and the material it is made of.

Samples with a cylindrical shape – being extended in one direction – are preferred for XCT studies since they allow the acquisition of radiographs from arbitrary viewing angles and mimic the shape of the reconstructed

einzelnen Charakterisierungsverfahren bei der Untersuchung des Gefüges von Werkstoffen und biologischen Objekten häufig bevorzugt [9, 10]. Die Auswahl des bzw. der Bildgebungsverfahren/s erfolgt in Abhängigkeit des zu charakterisierenden Probenvolumens und der für die Abbildung der maßgeblichen Merkmale in einem statistisch relevanten Probenvolumen erforderlichen Auflösung. Im Fall von XCT müssen außerdem die chemische Zusammensetzung der Probe und die Abschwächungslängen der Röntgenstrahlung berücksichtigt und die Photonenenergie entsprechend ausgewählt werden. Das heißt, dass die Auswahl des Tomographieverfahrens anwendungsspezifisch ist und vom Objekt und dem Material abhängt, aus dem sich das Objekt zusammensetzt.

Proben in zylindrischer Form, die sich in einer Richtung erstrecken, werden für XCT-Untersuchungen bevorzugt, da sie die Aufnahme von Röntgenbildern aus beliebigen Betrachtungswinkeln ermöglichen und die Kontur der

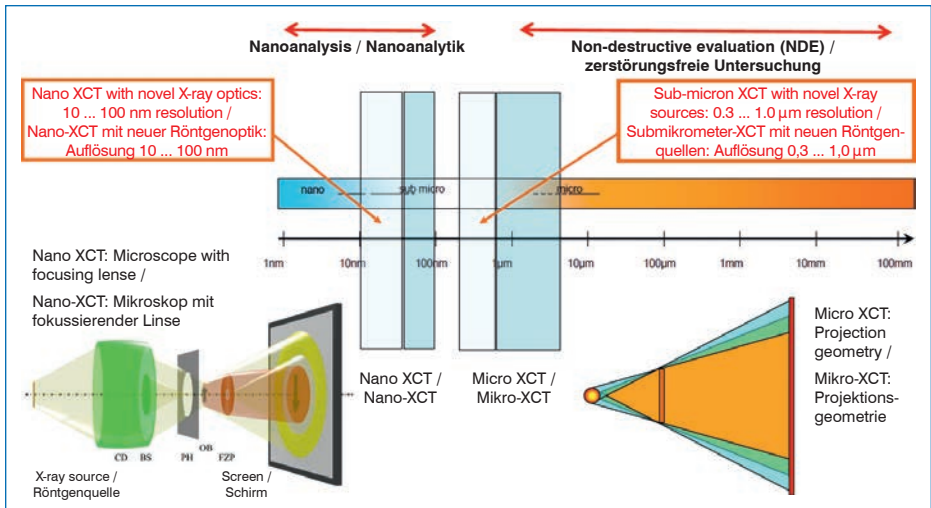


Fig. 1: Imaging schemes for micro XCT and nano XCT and resolution ranges, today and expected future developments (3–5 years).

Bild 1: Mikro-XCT- und Nano-XCT-Bildgebungssysteme und Auflösungsgebiete heute und für die Zukunft (3–5 Jahre) erwartete Entwicklungen.

3D image. However, some objects, e.g. microchips, are typically extended in two directions. Such flat objects require special approaches for the data acquisition and data analysis to achieve the required resolution and to mitigate artifacts. We showed that the tilted-axis approach provides less artifacts than the limited-angle approach [11].

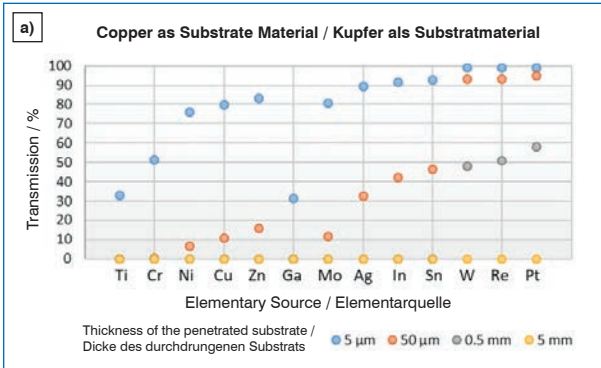
Laboratory micro XCT and nano XCT tools are commercially available with resolutions down to 0.7 μm and 50 nm, respectively. Fig. 1 demonstrates schematically the resolution ranges for micro XCT, as an extension of the existing NDE techniques, and nano XCT, as a typical nanoscale characterization technique – including state-of-the-art situation and expected extension within the next 3–5 years [12].

Conventionally, X-ray shadow imaging is achieved by a point source projection of the sample to a detector according to the intercept theorem. For this purpose, a point-like X-ray source is generated by guiding a focused electron beam onto a thin target of heavy metal like Tungsten. This optics-free approach is always subject of trade-offs between sample size and achievable spatial resolution. In order to maximize the geometric magnification, the source-to-object distance has to be very small, limiting the working distance available for high-resolution analysis. Practically, the achievable resolution is in the range of the size of the X-ray source. A recently developed two-stage magnification approach (Zeiss Versa) pushes the resolution beyond this limit to 0.7 μm for samples of several millimeters in size at a working distance of some centimeters.

rekonstruierten 3D-Aufnahme nachahmen. Einige Objekte, beispielsweise Mikrochips, erstrecken sich allerdings typischerweise in zwei Richtungen. Um die erforderliche Auflösung erzielen und das Auftreten von Artefakten in Grenzen halten zu können, sind für Datenerfassung und Datenanalyse bei solchen flachen Objekten spezielle Ansätze erforderlich. Wir haben gezeigt, dass der Ansatz mit geneigter Achse weniger Artefakte mit sich bringt als der Ansatz mit eingeschränktem Winkelbereich [11].

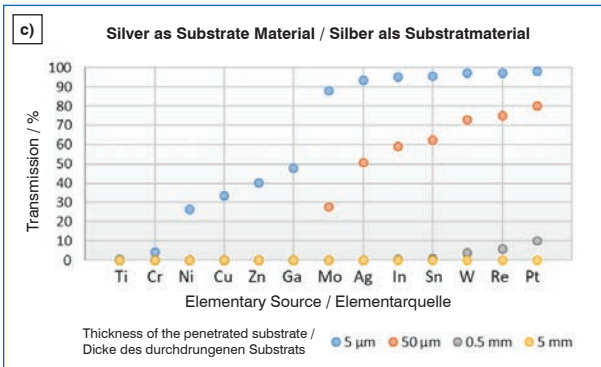
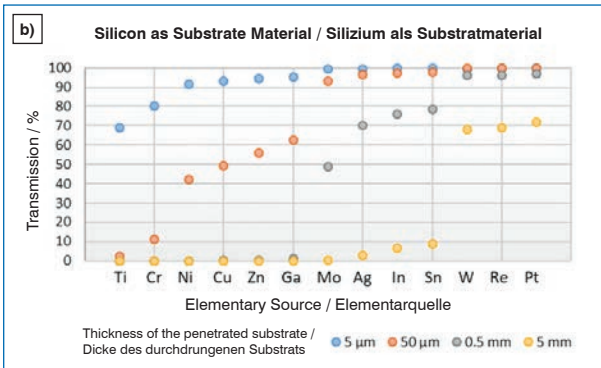
Mikro-XCT- und Nano-XCT-Laborgeräte sind kommerziell mit Auflösungen bis zu jeweils 0,7 μm bzw. 50 nm erhältlich. Bild 1 zeigt als schematische Darstellung den heutigen Stand der Technik, die für die nächsten 3–5 Jahre erwarteten Weiterentwicklungen und die entsprechenden Auflösungsbereiche für Mikro-XCT als eine Erweiterung der bestehenden zerstörungsfreien Prüfverfahren und für Nano-XCT als ein typisches Charakterisierungsverfahren im Nanobereich [12].

Herkömmliche Bildgebung durch Röntgenshattenbilder basiert auf einer dem Strahlensatz entsprechenden Projektion der Probe auf einen Detektor unter Verwendung einer punktförmigen Quelle. Zu diesem Zweck wird eine punktförmige Röntgenquelle durch Führung eines fokussierten Elektronenstrahls auf ein dünnes Target aus Schwermetall wie z. B. Wolfram erzeugt. Bei diesem Ansatz ohne Optik muss stets ein Kompromiss zwischen Probengröße und erreichbarer räumlicher Auflösung gesucht werden. Für eine maximale geometrische Vergrößerung muss der Abstand der Quelle zum Objekt äußerst klein sein, wodurch der für Analysen bei hoher Auflösung verfügbare Arbeitsabstand begrenzt wird. Faktisch liegt die erreichbare Auflösung im Bereich der Größe der Röntgenquelle. Mit einem kürzlich entwickelten, in zwei Stufen ablaufenden Vergrößerungsansatz (Zeiss Versa) wird eine Auflösung von 0,7 μm für Proben mit einer Größe von einigen Millimetern bei einem Arbeitsabstand von einigen Zentimetern erreicht.



Figs. 2a to c: Rate of photon transmission for three materials – Silicon (a), Copper (b), and Silver (c) – with varying thickness, for $K\alpha$ radiation from several anode materials of the X-ray source.

Bilder 2a bis c: Photonen-transmissionsrate für die drei Werkstoffe, Silizium (a), Kupfer (b) und Silber (c) mit unterschiedlicher Dicke für $K\alpha$ -Strahlung von mehreren Anodenmaterialien der Röntgenquelle.



In contrast, X-ray microscopy setups using focusing X-ray lenses, e.g. Fresnel zone plates, and accordingly nano XCT are the techniques of choice for two- or three-dimensional inspection of small sized ob-

Im Gegensatz dazu sind die Röntgenmikroskopie mit Röntgenlinsen, beispielsweise Fresnel-Zonenplatten, und dementsprechend auch die Nano-XCT Techniken der Wahl für die zwei- oder dreidimensionale Untersuchung von Ob-

jects and objects' interiors with a resolution well beyond that of visible light microscopy. Laboratory tools operated with Cu-K α radiation (8 keV) have Fresnel zone plates implemented as focusing lenses [13]. Achieving a resolution of about 50 nm, these techniques reveal structural characteristics and flaws, such as cracks and pores, or features with different composition. These unique capabilities enable a wide variety of applications in materials science and engineering, life science, geoscience and microelectronics [1, 14].

The absorption characteristics and the resulting maximum thickness of a sample for the acquisition of radiographs depends on the used photon energy and the respective attenuation lengths of the constituent elements and compounds. To demonstrate this thickness requirement, the rate of transmission is depicted for three materials with different atomic number and density in Fig. 2 (data from [15]). As an example, for Cu-K α radiation (as typically for state-of-the-art X-ray microscopes), the sample thickness has to be about 50 μm in case of Silicon. Samples have to be even thinner for materials with higher atomic number.

2. Sample Preparation for Nano XCT

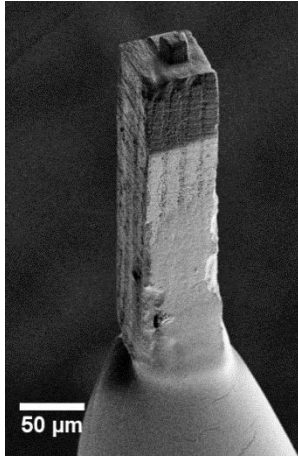
Only in some rare cases the objects to study have already a thickness of $< 100 \mu\text{m}$ to be transparent at 8 keV (Cu-K α radiation). Usually, the preparation of the sample is time-consuming since it includes several preparation steps, depending on the kind of samples: mechanical preparation (sawing, grinding, polishing), chemical preparation (etching), laser beam ablation and/or Focused Ion Beam (FIB) milling. If large amounts of sample material have to be removed, mechanical preparation followed by either plasma FIB or laser beam material re-

jekten kleiner Größe und des Objektinneren mit einer weitaus besseren Auflösung als sie in der Mikroskopie mit sichtbarem Licht möglich ist. Laborgeräte, die mit Cu-K α -Strahlung (8 keV) arbeiten, sind mit als fokussierende Linsen ausgeführten Fresnel-Zonenplatten ausgestattet [13]. Bei diesen Techniken wird eine Auflösung von ca. 50 nm erreicht, sodass Strukturmerkmale und Fehler wie beispielsweise Risse und Poren oder Merkmale mit unterschiedlicher Zusammensetzung offenbart werden können. Diese einzigartige Möglichkeit ermöglicht eine große Bandbreite an Anwendungen in den Bereichen Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik, Biowissenschaften, Geowissenschaften und Mikroelektronik [1, 14].

Die Absorptionseigenschaften und die sich daraus ergebende maximale Dicke einer Probe für die Aufnahme von Röntgenbildern ist abhängig von der eingesetzten Photonenenergie und den entsprechenden Abschwächungslängen der Bestandteile und Verbindungen. Bild 2 demonstriert diese Dickenanforderung unter Angabe der Transmissionsrate für drei Werkstoffe mit unterschiedlicher Ordnungszahl und Dichte (Daten aus [15]). Für Cu-K α -Strahlung (typisch für moderne Röntgenmikroskope) muss die Probendicke im Fall von Silizium beispielsweise etwa 50 μm betragen. Proben müssen für Werkstoffe mit höherer Ordnungszahl sogar noch dünner sein.

2. Probenpräparation für Nano-XCT

Nur in seltenen Fällen besitzen die zu untersuchenden Objekte bereits eine Dicke von $< 100 \mu\text{m}$, die für eine Transparenz bei 8 keV (Cu-K α -Strahlung) erforderlich ist. Üblicherweise nimmt die Präparation der Probe viel Zeit in Anspruch, da sie, je nach Probe, mehrere unterschiedliche Schritte umfasst: mechanische Präparation (Sägen, Schleifen, Polieren), chemische Präparation (Ätzen), Laserstrahlablation und/oder Ionenätzung mit fokussierten Ionenstrahlen (FIB). Müssen große Mengen des Probenmaterials entfernt werden, folgt der mechanischen Präparation

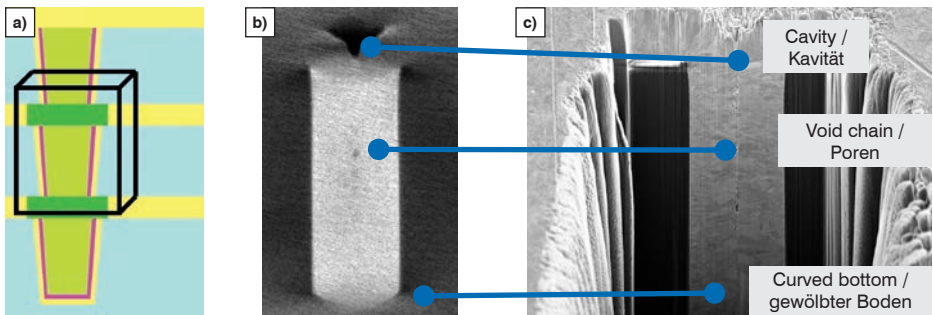


◀ **Fig. 3:** Image of a sample for nano XCT with a cross-section of $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$.

Bild 3: Aufnahme einer Nano-XCT-Probe mit einem Querschnitt von $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$.

Figs. 4a to c: Scheme of the prepared region of interest (ROI) of a 3D stack of microchips (a), visualization of filling defects (voids) in the center of a Cu TSV (nano XCT study, virtual vertical cross-section, b) and SEM image of a FIB cross-section through this void in the ROI (c) [3,4].

Bilder 4a bis c: Schematische Darstellung des zu untersuchenden präparierten Bereichs eines 3D-Mikrochip-Stapels (a), Visualisierung von Füllfehlern (Hohlräume) in der Mitte eines Cu-TSV (Nano-XCT-Untersuchung, virtueller vertikaler Querschnitt, b) und REM-Aufnahme eines FIB-Querschnitts durch diesen Hohlraum im zu untersuchenden Bereich (c) [3, 4].



moval and subsequent FIB milling are used [16,17]. Fig. 3 shows an image of a sample which was prepared for nano XCT studies.

The black cuboid in Fig. 4 (left) shows schematically the extracted region of interest (ROI) from a 3D stack of thinned integrated circuits. The vertical Copper interconnects in Silicon are named Through Silicon Vias (TSVs). For process development and physical failure analysis, voids in Cu TSVs have to be localized. The virtual cross-section through a Cu TSV proves that voids in the range of 100 nm can be clearly visualized using nano XCT (see Fig. 4 (middle)). Target Focused Ion Beam

entweder eine Werkstoffabtragung durch Plasma-FIB oder Laserstrahlen und anschließendes FIB-Ionenätzen [16, 17]. Bild 3 zeigt eine Aufnahme einer für Nano-XCT-Untersuchungen präparierten Probe.

Der schwarze Quader in Bild 4 (links) stellt den entsprechend extrahierten Bereich eines 3D-Stapels gedünnter integrierter Schaltungen schematisch dar. Die vertikalen Kupferverbindungen im Silizium werden Silizium-Durchkontaktierungen oder Through Silicon Vias (TSVs) genannt. Für Verfahrensentwicklung und physikalische Fehleranalyse müssen Poren in Cu-TSVs lokalisiert werden. Der virtuelle Querschnitt durch einen Cu-TSV bestätigt, dass Poren in einem Größenbereich von 100 nm durch Nano-XCT abgebildet

(FIB) cross-sections through the ROI and subsequent Scanning Electron Microscopy (SEM) imaging with nm resolution – see Fig. 4 (right) – validate the nano XCT data, and in addition, reveal more and smaller voids [3,4]. It is to mention that the target preparation at a specific position (e.g. a defect) of a usually opaque sample, that was identified using nano XCT, requires a shuttle and navigation solution from the nano XCT tool to the SEM/FIB tool.

werden können (siehe Bild 4 (Mitte)). Der Zielquerschnitt mit fokussiertem Ionenstrahl (FIB) durch den zu untersuchenden Bereich und die anschließende Bildgebung durch Rasterelektronenmikroskopie (REM) mit nm-Auflösung (siehe Bild 4 (rechts)) bestätigt die Nano-XCT-Daten und offenbart zudem mehr und kleinere Poren [3, 4]. Es sollte hier angemerkt werden, dass die Zielpräparation an einer bestimmten Position (z.B. einem Fehler) einer normalerweise lichtundurchlässigen Probe, die mittels Nano-XCT untersucht wurde, eine Shuttle- und Navigationslösung vom Nano-XCT-Gerät hin zum REM/FIB-Gerät erfordert.

3. Applications

3.1 Engineering Materials: Metal matrix Composites

The combination of XCT with in-situ micro-mechanical experiments merges the advantage of nondestructive high-resolution 3D imaging of the microstructure of materials with the observation of phenomena like crack initiation, crack propagation and in case of composites delamination at interfaces during mechanical loading. While a

3. Anwendungen

3.1 Technische Materialien: Metallmatrix-Verbundstoffe

Die Kombination von XCT mit mikromechanischen in-situ-Versuchen bringt den Vorteil der zerstörungsfreien 3D-Bildgebung des Werkstoffgefüges mit hoher Auflösung und zusätzlich die Möglichkeit, Phänomene wie Rissinitiiierung, Rissausbreitung und, im Fall von Verbundwerkstoffen, die Ablösung an Grenzflächen bei mechanischer Belastung

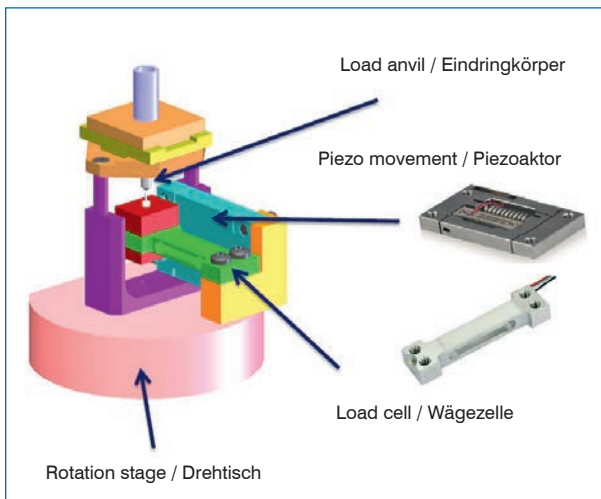
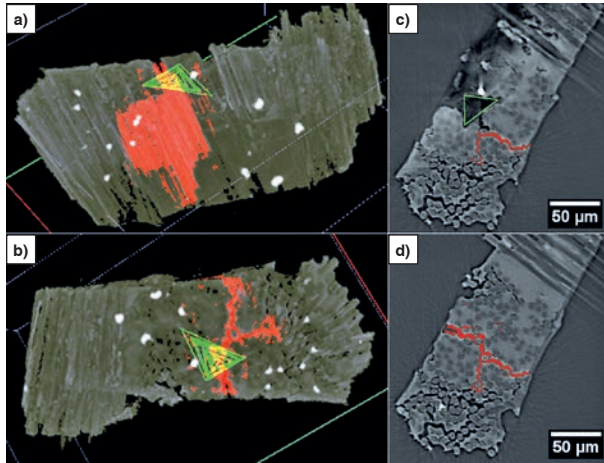


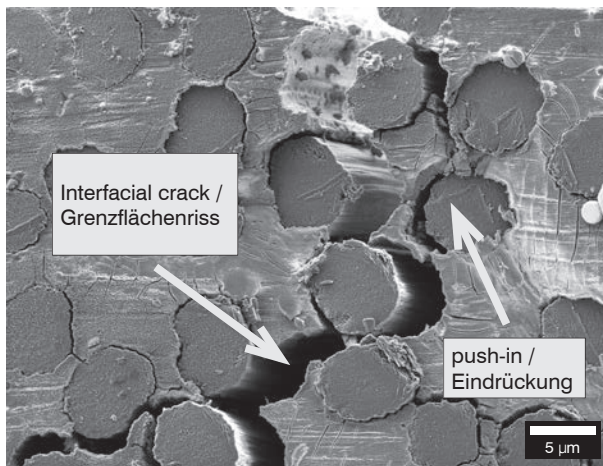
Fig. 5: Micro-indentation testing rig for in-situ micromechanical tests in XCT systems [19].

Bild 5: Mikro-Indentationstest für mikromechanische in-situ-Tests in XCT-Systemen [19].



Figs. 6: (top) Micro XCT based virtual cross-sections through a Carbon fiber reinforced Aluminum matrix composite, 3D reconstructed data set (a+b) represents indenter tip (green) and the crack along the Carbon fiber/Aluminum matrix interface (red), and virtual cross-sections of the crack grown along the interfaces (c+d), (bottom) SEM image with visualization of interface cracks and push-in phenomenon [19].

Bilder 6: Oben: mittels Mikro-XCT erstellte virtuelle Querschnitte durch einen kohlefaserverstärkten Aluminiummatrix-Verbundwerkstoff, 3D-rekonstruierter Datensatz (a+b), der die Indenterspitze (grün) und den Riss entlang der Grenzfläche Kohlenfaser/Aluminiummatrix (rot) abbildet; virtuelle Querschnitte des sich entlang der Grenzflächen ausbreitenden Risses (c+d). Unten: REM-Aufnahme mit Darstellung von Grenzflächenrissen und „push-in“-Phänomen [19].



micro-DCB (Double Cantilever Beam) test was applied for crack evolution studies in microchips [18], a micro-indentation testing rig is used for in-situ mechanical loading of multi-component materials. This customized micro-mechanical test system was designed for in-situ micro-indentation experiments in such a way that it fits into the limited space of the nano XCT tool in particular and that the indenter tip and the sample fit into the field of view of the X-ray microscope (see Fig. 5). The in-situ study

zu betrachten. Für Untersuchungen der Rissentwicklung in Mikrochips wurde ein Mikro-DCB-Versuch (Double Cantilever Beam) [18] durchgeführt, während für die in-situ-Belastung der Mehrkomponentenmaterialien ein Aufbau zur Mikroindentation genutzt wurde. Dieses spezielle mikromechanische Prüfsystem wurde für in-situ-Mikroindentationsversuche derart ausgelegt, dass es in erster Linie in den begrenzten Raum des Nano-XCT-Geräts passt und Indenterspitze und Probe in das Sichtfeld des Röntgenmikro-

of mechanical properties of metal matrix composites requires an operating range of forces up to 500 mN, i. e. the test system has to be stiff enough for these forces. Carbon fibre reinforced Aluminum matrix composites were studied using both micro and nano-XCT tools with the goal to evaluate the fracture behavior in MMCs. Delamination along interfaces and cracking are clearly visible in Fig. 6 [19].

3.2 Energy Technologies: Hydrogen Storage Materials

The use of reaction chambers in XCT tools allows operando studies of chemical processes, e.g. during catalysis and in energy storage and conversion systems (see e.g. application to batteries and fuel cells: [20]). A reaction chamber that fits into the nano XCT tool and that allows operando studies

skops fallen (siehe Bild 5). Die in-situ-Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von Metallmatrix-Verbundwerkstoffen erfordert einen Betriebskraftbereich von bis zu 500 mN. Das bedeutet, das Versuchssystem muss über eine für diese Kräfte ausreichende Steifigkeit verfügen. Zur Beurteilung des Bruchverhaltens in Metallmatrix-Verbundwerkstoffen wurden kohlefaserverstärkte Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffe unter Verwendung von Mikro- als auch Nano-XCT-Geräten untersucht. Die Ablösung entlang von Grenzflächen und die Rissbildung sind in Bild 6 deutlich zu erkennen [19].

3.2 Energietechnik: Wasserstoffspeichermaterialien

Der Einsatz von Reaktionskammern in XCT-Geräten ermöglicht operando-Untersuchungen chemischer Prozesse, z.B. bei der Katalyse und in Energiespeicher- und -umwandlungssystemen (siehe z.B. Anwendung für Batterien und Brennstoffzellen: [20]). Es wurde eine Reaktionskammer konstruiert, die

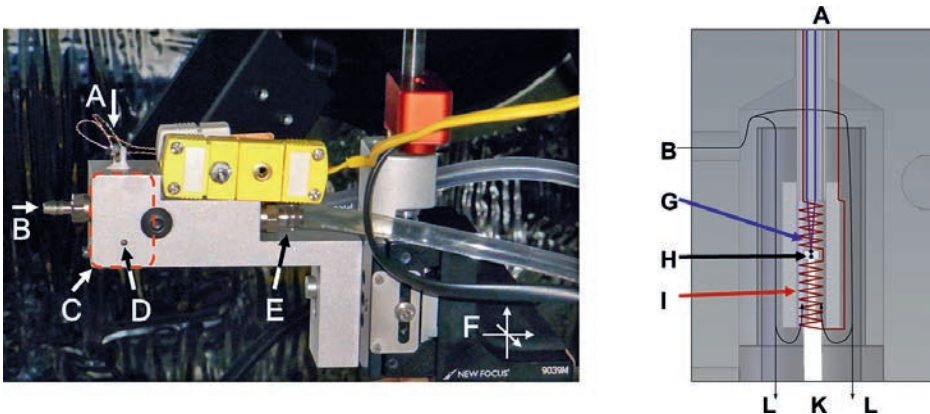
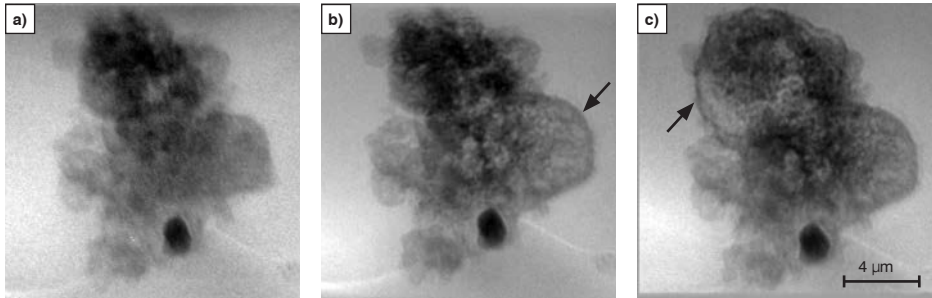


Fig. 7: Photo and scheme of the reaction chamber, A – electrical connections (thermo element, heat element), B – entry for process gas, C – area for detailed scheme (right), D – entry window for X-ray beam, E – cooling water supply, F – motorized sample stage, G – thermo element, H – sample, I – heating filament, K – motorized sample holder and L – gas outlet.

Bild 7: Foto und schematische Darstellung der Reaktionskammer, A – elektrische Anschlüsse (Thermoelement, Heizelement), B – Einlass für Prozessgas, C – Bereich der detaillierten schematischen Darstellung (rechts), D – Röntgenstrahleintrittsfenster, E – Kühlwasserversorgung, F – motorisierter Probenstisch, G – Thermoelement, H – Probe, I – Heizdraht, K – motorisierter Probenhalter und L – Gasaustritt.



Figs. 8a to c: Sequence of X-ray images of an iron powder agglomerate during oxidation in wet atmosphere (N_2 ; 70%rh) at a temperature of 770 K. The observed change in morphology occurred stepwise. The images represent an averaged intensity over 25–70 frames during a phase of steady state. The arrows point to regions of iron oxide shell formation [21, 22].

Bilder 8a bis c: Röntgenbildfolge eines Eisenpulveragglomerats während der Oxidation in feuchter Atmosphäre (N_2 ; 70 % rF) bei einer Temperatur von 770 K. Die beobachtete Morphologieänderung tritt schrittweise ein. Die Aufnahmen zeigen die über 25–70 Einzelbilder gemittelte Intensität während einer Phase ohne Morphologieänderung. Die Pfeile zeigen auf Bereiche, in denen sich eine Eisenoxidhülle bildet [21, 22].

of the morphological change of powder agglomerates in different atmospheres (nitrogen, argon/hydrogen) and at elevated temperature (up to 770 K) was built (see Fig. 7) [21, 22].

The redox reaction cycle of iron, $3 Fe + 4 H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 4 H_2$, is a possible reaction for hydrogen storage: Hydrogen generation results from the reaction of highly reactive nano-sized iron powder with water steam, and Hydrogen storage is performed by the reaction of magnetite powder with Hydrogen. To maintain the high reactivity and storage capacity of the material for a high number of storage cycles, morphological changes that cause coarsening of the iron powder have to be avoided. Tomography data of the sample were acquired before and after the reaction in pure nitrogen atmosphere. During the experiment a series of radiographs was recorded. Significant morphology changes were observed during oxidation: At a temperature of 770 K, an iron oxide shell was formed around the agglomerate. This shell was deformed by

in das Nano-XCT-Gerät passt und operando-Untersuchungen der morphologischen Veränderung von Pulveragglomeraten in unterschiedlichen Atmosphären (Stickstoff, Argon/Wasserstoff) und bei erhöhter Temperatur (bis zu 770 K) ermöglicht (siehe Bild 7) [21, 22].

Der Redox-Reaktionszyklus von Eisen, $3 Fe + 4 H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 4 H_2$, ist eine mögliche Reaktion für die Wasserstoffspeicherung: Die Erzeugung von Wasserstoff ist Folge der Reaktion hochreaktiven nanoskaligen Eisenpulvers mit Wasserdampf, wobei der Wasserstoff durch die Reaktion von Magnetitpulver mit Wasserstoff gespeichert wird. Um die hohe Reaktivität und Speicherkapazität des Materials für eine große Zahl an Speicherkyklen aufrechtzuerhalten, müssen morphologische Veränderungen, die eine Vergrößerung des Eisenpulvers verursachen, verhindert werden. Tomographiedaten der Probe wurden vor und nach der Reaktion in reiner Stickstoffatmosphäre erfasst. Während des Versuchs wurde eine Serie von Röntgenaufnahmen aufgezeichnet. Während der Oxidation wurden wesentliche Morphologieänderungen beobachtet: Bei einer Temperatur von 770 K bildete

the outgassing hydrogen evolution (see Fig. 8).

3.3 Biomimetics: Diatoms

The study of the hierarchical structure of diatoms, one of the ecologically most significant group of organisms on earth, is of interest for engineers because of a variety of potential applications based on materials with tailored mechanical properties. The material properties of diatoms are determined by their unique hierarchical organization with micro- and nano-sized open volume. Information about geometry and morphology of the diatoms' frustule (the cell wall) can be obtained using scanning electron microscopy (SEM) at cross-sections. Undoubtedly, the advantage of nano XCT is that this technique provides a high-resolution 3D data set of the internal structure of diatoms, particularly of the morphology of cell wall components, non-destructively (Fig. 9) [8]. The obtained 3D data of the interior allow to generate a structure model of the diatom frustule.

sich um das Agglomerat eine Eisenoxidhülle. Diese Hülle wurde durch die Ausgasung von Wasserstoff verformt (siehe Bild 8).

3.3 Biomimetik: Diatomeen

Die Untersuchung der hierarchischen Struktur von Diatomeen (Kieselalgen), eine der ökologisch bedeutendsten Organismengruppen auf der Erde, interessiert Ingenieure aufgrund der Vielfalt potenzieller Anwendungen von Materialien mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften. Die stofflichen Eigenschaften von Diatomeen werden durch ihre einzigartige hierarchische Anordnung mit mikroskaligem bzw. nanoskaligem offenen Volumen bestimmt. An Querschnitten können mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) Informationen zu Geometrie und Morphologie der Diatomeen-Frustel (Zellhülle) erfasst werden. Zweifelslos liegt der Vorteil der Nano-XCT darin, dass diese Technik zerstörungsfrei einen 3D-Datensatz der internen Struktur von Diatomeen und insbesondere der Morphologie von Komponenten der Zellhülle mit hoher Auflösung liefert (Bild 9) [8]. Anhand der erhaltenen 3D-Daten aus dem Innern kann ein Strukturmodell der Diatomeen-Frustel erzeugt werden.

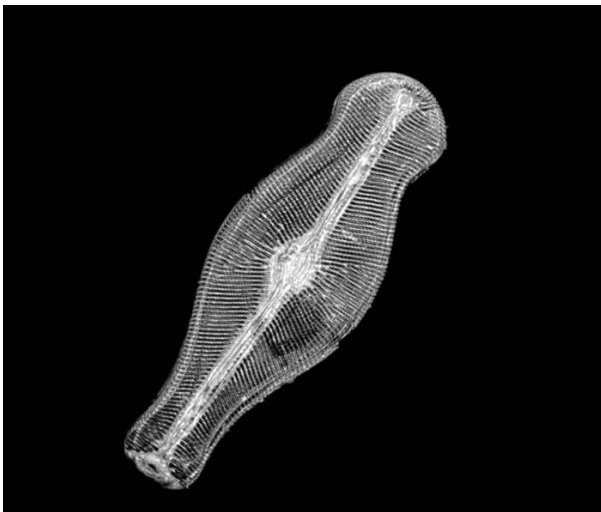


Fig. 9: 3D visualization of a diatom frustule, based on radiographs acquired with X-ray microscopy in phase contrast mode.

Bild 9: 3D-Darstellung einer Frustel basierend auf mittels Röntgenmikroskop im Phasenkontrast aufgenommenen Röntgenaufnahmen.

4. Summary and Outlook

Micro and nano X-ray computed tomography (XCT) are techniques for two- or three-dimensional inspection of small sized objects and objects' interiors with a resolution well beyond that of visible light microscopy. Potential and limits for the nondestructive X-ray based imaging of geometry, materials' microstructure and defects in products that are made of metallic and ceramic materials as well as of biological objects were discussed. The 3D digital representation of internal structures of composite and skeleton materials – based on XCT data – allows to facilitate reliable numerical models for the prediction of local material properties [23]. The introduction of computer vision and machine learning techniques to reconstruction problems of XCT data enables accurate and artifact-free reconstructed volume data even for data obtained from misaligned XCT systems. Furthermore, deep convolutional neural network is a great promise for complex data processing, and this approach provides a new practical solution to incomplete data reconstruction problems as in the limited-angle and tilted-axis laminography case.

Future developments in high-resolution X-ray microscopy and nano XCT will enable to investigate thicker samples using higher photon energies, to reduce the measurement time and consequently the time-to-data, and to improve the spatial resolution. Novel laboratory X-ray sources, e.g. using micro-patterned anodes [24], and novel focusing optics, e.g. multilayer Laue lenses [25,26], will enable spatial resolutions down to 0.3 μm and 10 nm for micro XCT and nano XCT, respectively (see Fig. 1) [12], and shorter data acquisition times. In addition, further development and better

4. Zusammenfassung und Ausblick

Mikro- und Nano-Röntgen-Computertomographie (XCT) sind Techniken für die zwei- oder dreidimensionale Untersuchung von kleinen Objekten und des Objektinneren mit einer weitaus höheren Auflösung als mittels Mikroskopie mit sichtbarem Licht. Möglichkeiten und Grenzen der zerstörungsfreien Röntgenbildgebung von Geometrie, Werkstoffgefüge und Materialfehlern in Produkten aus metallischen und keramischen Werkstoffen sowie von biologischen Objekten wurden erörtert. Die auf XCT-Daten basierende digitale 3D-Darstellung von Strukturen im Innern von Verbundwerkstoffen und Skelettmaterialien ermöglicht die Erzeugung zuverlässiger numerischer Modelle für die Vorhersage lokaler Werkstoffeigenschaften [23]. Die Einführung von Computer-Vision-Systemen und Verfahren des maschinellen Lernens bei Rekonstruktionsproblemen mit XCT-Daten ermöglicht präzise und artefaktfreie rekonstruierte Volumendaten selbst für Daten aus nicht exakt justierten XCT-Systemen. Das Deep Convolutional Neural Network (neuronaales Netzwerk) erweist sich im Bereich komplexer Datenverarbeitung als vielversprechend. Dieser Ansatz bietet eine neue praktische Lösung für Rekonstruktionsprobleme bei unvollständigen Daten wie beispielsweise im Fall der Laminographie mit eingeschränktem Winkelbereich und geneigter Achse.

Durch zukünftige Entwicklungen in der hochauflösenden Röntgenmikroskopie und Nano-XCT werden die Untersuchung dickerer Proben mit höheren Photonenenergien, eine Verkürzung der Messzeit, also auch der Zeit bis zum Datenzugriff, und eine Verbesserung der räumlichen Auflösung möglich. Werden neue Laborröntgenquellen genutzt, beispielsweise unter Verwendung von mikrostrukturierten Anoden [24] und neuer Fokussieroptik (z.B. mit Vielschicht-Laue-Linsen [25, 26]), werden für Mikro-XCT bzw. Nano-XCT räumliche Auflösungen von bis zu jeweils 0,3 μm und 10 nm (siehe Bild 1) [12] und kürzere Datenerfas-

parallelization of alignment, reconstruction and segmentation algorithms, possibly applying artificial intelligence (AI) approaches, will improve data quality as well as reduce the time-to-data of the reconstruction and subsequent segmentation steps.

The penetration of larger samples and structures is a frequent request in materials research, e.g. for imaging of crack propagation in materials and for studying kinetic electrochemical processes (e.g. in battery and fuel cell components/materials), as well as in semiconductor industry for non-destructive imaging of structures in whole wafers and chips (without sample preparation), or even wafer stacks. Existing state-of-the-art nano XCT has the drawback that only small samples (typically 50 μm size) can be studied since Cu-K α radiation with 8 keV photon energy is used, and consequently, sample preparation to extract the region of interest (ROI) is usually necessary. Therefore, there is a strong need to use higher photon energies that allow to study larger samples with thicknesses in the millimeter range (depending on the photon energy used and the chemical composition of the sample). Thicker samples will provide the opportunity for developing novel materials and for studying kinetic processes in larger volumes (larger process chamber), e.g. for energy storage and conversion. X-ray microscopy and nano XCT at high photon energies require novel X-ray lenses that substitute state-of-the-art Fresnel zone plates. Recently developed multilayer Laue lenses are a promising approach to extend laboratory nano XCT to photon energies > 10 keV [27]. These developments will be the "door opener" for the industrial application of nano XCT in materials and process development, process monitoring, and quality assurance of high-tech products with internal components that have geometrical dimensions or

sungszeiten erzielt. Zusätzlich hierzu werden Weiterentwicklungen und eine verbesserte Parallelisierung bei Justierung, Rekonstruktions- und Segmentierungsalgorithmen, gegebenenfalls unter Anwendung von Ansätzen mit künstlicher Intelligenz (KI), die Datenqualität verbessern sowie die Zeit bis zum Datenzugriff für die Rekonstruktion und anschließende Segmentierungsschritte reduzieren.

Häufig wird seitens der Materialforschung das Eindringen in größere Proben und Strukturen gefordert, beispielsweise zur Abbildung der Rissausbreitung in Werkstoffen und für die Untersuchung kinetischer elektrochemischer Prozesse (z. B. in Batterie- bzw. Brennstoffzellenkomponenten bzw. -materialien) sowie in der Halbleiterindustrie zur zerstörungsfreien Abbildung von Strukturen in ganzen Wafern und Chips (ohne Probenpräparation) oder sogar in Wafer-Stapeln. Die aktuell dem Stand der Technik entsprechende Nano-XCT hat den Nachteil, dass nur kleine Proben (typischerweise einer Größe von 50 μm) untersucht werden können, da hierfür Cu-K α -Strahlung mit einer Photonenenergie von 8 keV eingesetzt wird. Infolgedessen ist meistens eine Probenpräparation erforderlich, bei der der zu untersuchende Bereich extrahiert wird. Daher ist es unbedingt notwendig, mit höheren Photonenenergien zu arbeiten, durch die die Untersuchung größerer Proben mit Dicken im Millimeterbereich (je nach eingesetzter Photonenenergie und chemischer Zusammensetzung der Probe) ermöglicht wird. Durch dickere Proben bietet sich die Möglichkeit, neue Werkstoffe zu entwickeln und kinetische Prozesse, z. B. für Energiespeicherung und -umwandlung, in größeren Volumen (größere Prozesskammer) zu untersuchen. Röntgenmikroskopie und Nano-XCT mit hohen Photonenenergien machen neue Röntgenlinsen erforderlich, die die dem heutigen Stand der Technik entsprechenden Fresnel-Zonenplatten ersetzen. Kürzlich entwickelte Vielschicht-Laue-Linsen stellen einen vielversprechenden Ansatz für die Weiterentwicklung der Labor-Nano-XCT mit Photonenenergien > 10 keV dar [27]. Diese Entwicklungen werden

microstructure features in the micro- and nanometer range.

Acknowledgements

The authors thank André Clausner, Fraunhofer IKTS Dresden, Lars Röntzsch, Fraunhofer IFAM Dresden, and Cathy Kilroy, National Institute of Water & Atmospheric Research Ltd. Christchurch (New Zealand), for providing samples and for useful discussions. Emre Topal's studies were funded in part by the German Federal Ministry of Economic Affairs and Energy (BMWi) via the "ATEC" project, IGF 150 EBR/1. Izabela Zgłobicka acknowledges funding provided by German Academic Exchange Service (DAAD) within Research Grants – Short-Term Grants 2017 (ID: 57314023). Markus Löffler acknowledges support by Deutsche Forschungsgemeinschaft via the cluster of excellence EXC1056 "Center for Advancing Electronics Dresden" (cfaed).

References / Literatur

- [1] Merkle, A. P.; Gelb, J.: "Ascent of 3D X-ray Microscopy in the Laboratory", *Microscopy Today* 21 (2013), 10–15.
DOI: 10.1017/S1551929513000060
- [2] Zschech, E.; Yun, W.; Schneider, G.: "High-resolution X-ray Imaging – A Powerful Technique for Application in Semiconductor Industry", *Appl. Phys. A* 92 (2008) 423–429
- [3] Kong, L. W.; Lloyd, J. R.; Yeap, K. B.; Zschech, E.; Rudack, A.; Liehr, M.; Diebold, A.: "Applying X-ray Microscopy and Finite Element Modelling to Identify the Mechanism of Stress-Assisted Void Growth in Through Silicon Vias", *J. Appl. Phys.* 110 (2011), 053502

dafür sorgen, dass die Nano-XCT in Werkstoff- und Verfahrensentwicklung, Prozessüberwachung und Qualitätssicherung von High-Tech-Produkten mit internen Komponenten mit mikro- und nanoskaligen geometrischen Abmessungen oder Gefügemerkmalen industriell genutzt werden kann.

Danksagung

Die Autoren möchten sich bei André Clausner, Fraunhofer IKTS Dresden, Lars Röntzsch, Fraunhofer IFAM Dresden und Cathy Kilroy, National Institute of Water & Atmospheric Research Ltd. Christchurch (Neuseeeland) für die Bereitstellung der Proben und die wertvollen Gespräche bedanken. Die Untersuchungen von Emre Topal wurden teilweise durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen des „ATEC“-Projekts, IGF 150 EBR/1 finanziert. Izabela Zgłobicka bedankt sich für die Förderung durch den Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) im Rahmen von Forschungsstipendien – Kurzstipendien 2017 (ID: 57314023). Markus Löffler bedankt sich bei der Deutsche Forschungsgemeinschaft für die Unterstützung über den Exzellenzcluster EXC1056 „Center für Advancing Electronics Dresden“ (cfaed).

- [4] Knickerbocker, J. U.; Kong, L. W.; Niese, S.; Diebold, A.; Zschech, E.: "3D Interconnect Technology", in "Advanced Interconnects for ULSI Technology" (Eds. M. Baklanov, P. S. Ho, E. Zschech), John Wiley & Sons Chichester, (2012), pp. 437–502
DOI: 10.1002/9781119963677.ch12
- [5] Schilling, P. J.; Karedla, B. R.; Tatiparthi, A. K.; Verges, M. A.; Herrington, P. D.: "X-ray Computed Microtomography of Internal Damage in Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites", *Composites Science and Technology* 65 (2005), 2071–2078
DOI: 10.1016/j.compscitech.2005.05.014

- [6] Shearing, P.; Wu, Y.; Harris, S. J.; Brandon, N.: "In Situ X-Ray Spectroscopy and Imaging of Battery Materials", *The Electrochemical Society Interface*, Fall 2011 (2011), 43–47
- [7] Li, Q.; Gluch, J.; Krüger, P.; Gall, M.; Neinhuis, C.; Zschech, E.: "Pollen Structure Visualization using High-resolution Laboratory-based Hard X-ray Tomography", *Biochemical and Biophysical Res. Comm.* 479 (2016), 272–276
DOI: 10.1016/j.bbrc.2016.09.058
- [8] Zgłobicka, I.; Li, Q.; Gluch, J.; Płocińska, M.; Noga, T.; Dobosz, R.; Szoszkiewicz, R.; Witkowski, A.; Zschech, E.; Kurzydłowski, K. J.: "Visualization of the Internal Structure of *Didymosphenia Geminata* Frustules using Nano X-ray Tomography", *Scientific Reports* 7 (2017), 9086
DOI: 10.1038/s41598-017-08960-5
- [9] Shearing, P. R.; Gelb, J.; Brandon, N. P.: "X-ray Nano Computerised Tomography of SOFC Electrodes using a Focused Ion Beam Sample Preparation Technique", *J. Eur. Ceram. Soc.* 30 (2010), 1809–1814
DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2010.02.004
- [10] Zschech, E.; Niese, S.; Löffler, M.; Wolf, M. J.: "Multi-scale X-ray Tomography for Process and Quality Control in 3D TSV Packaging", *Proc. IMAPS* (2014)
DOI: 10.4071/isom-TP12
- [11] Krüger, P.; Niese, S.; Zschech, E.; Gelb, J.; Feser, M.: "Improved Scanning Geometry to Collect 3D-Geometry Data in Flat Samples", in *Proc. 10th Int. Conf. on X-ray Microscopy XRM*, AIP Publishing, 1365 (2011), 258–260
DOI: 10.1063/1.3625353
- [12] Zschech, E.; Yun, W.: "Novel Metrology Solution for Advanced Packaging based on Multi-energy X-ray Microscopy and Tomography", *Proc. Int. FCMN Conf., Monterey/CA* (2017)
- [13] Chu, Y. J.; Yi, J. M.; De Carlo, F.; Shen, Q.; Lee, W. K.; Wu, H. J.; Wang, C. L.; Wang, J. Y.; Liu, C. J.; Wang, C. H.; Wu, S. R.; Chien, C. C.; Hwu, Y.; Tkachuk, A.; Yun, W.; Feser, M.; Liang, K. S.; Yang, C. S.; Je, J. H.; Margaritondo, G.: "Hard X-ray Microscopy with Fresnel Zone Plates Reaches 40nm Rayleigh Resolution", *Appl. Phys. Lett.* 92 (2008), 103119–2
DOI: 10.1063/1.2857476
- [14] Zschech, E.; Gluch, J.; Niese, S.; Lewanowska, A.; Wolf, M. J.; Röntzsch, L.; Löffler, M.: "Application of X-ray Microscopy in Microelectronics and Energy Technology", *Prakt. Met. Sonderband* 47 (2015) 3–11
- [15] Henke, B. L.; Gullikson, E. M.; Davis, J. C.: X-ray Interactions: Photoabsorption, Scattering, Transmission, and Reflection at $E=50\text{--}30000$ eV, $Z=1\text{--}92$, *Atomic Data and Nuclear Data Tables* 54 (no.2) (1993), 181–342
DOI: 10.1006/adnd.1993.1013
- [16] Kwakman, L.; Franz, G.; Taklo, M.; Klumpp, A.; Ramm, P.: "Characterization and Failure Analysis of 3D Integrated Systems using a Novel Plasma-FIB System", *AIP Conf. Proc.* 1395 (2011), 269
DOI: 10.1063/1.3657902
- [17] Stegmann, H.; Dömer, H.; Rosenkranz, R.; Zschech, E.: "Efficient Target Preparation by Combined Pulsed Laser Ablation and FIB Milling", *Microscopy and Microanalysis* 17 (2011), 658–659
DOI: 10.1017/S1431927611004168
- [18] Kutukova, K.; Niese, S.; Sander, C.; Standke, Y.; Gluch, J.; Gall, M.; Zschech, E.: "A Laboratory X-ray Microscopy Study of Cracks in On-chip Interconnect Stacks of Integrated Circuits", *Applied Physics Letters*, submitted (2018)
- [19] Kutukova, K.; Gluch, J.; Zschech, E.: "Crack Imaging in Composite Materials using High-resolution Nano-XCT", *Physical Metallurgy and Materials Science Conference AMT, Rawa Mazowiecka* (2016)
- [20] Shearing, P. R.; Eastwood, D. S.; Bradley, R. S.; Gelb, J.; Cooper, S. J.; Tariq, F.; Brett, D. J. L.; Brandon, N. P.; Withers, P. J.; Lee, P. D.: "Exploring Electrochemical Devices using X-ray Microscopy: 3D Microstructure of Batteries and Fuel Cells", *Microscopy and Analysis* (2013) 19–22
- [21] Gluch, J.; Niese, S.; Jung, C.; Röntzsch, L.; Zschech, E.; Kieback, B.: "Electron and X-ray Tomography of Iron/Iron Oxide Redox Reactions for Large-Scale Hydrogen Storage", *Microscopy and Microanalysis* 19 (2013) 578–579
DOI: 10.1017/S1431927613004881
- [22] Zschech, E.; Gluch, J.; Röntzsch, L.; Kieback, B.; Niese, S.; Kubec, A.; Braun, S.; Leson, A.: "Laboratory Nano-XCT Study of Metal/Metal Oxide Cyclic Redox Reactions for Hydrogen Storage", *Proc. 12th Int. Conf. on X-ray Microscopy Conf. XRM, Melbourne* (2014)

- [23] Topal, E.; Löffler, M.; Zschech, E.: "An Improved FDK Algorithm for Reconstruction of Misaligned Cone-beam CT System", 8th Conf. on Industrial Computed Tomography ICT, Wels (2018)
- [24] Yun, W.; Stripe, B.; Lyon, A.; Reynolds, D.; Chen, S.; Spink, I.; Lewis, S.: "Impact of new high flux laboratory systems", Synchrotron Radiation Instrumentation Conf. SRI, Brookhaven (2015)
- [25] Maser, J.; Stephenson, G. B.; Vogt, S.; Yun, W.; Macrander, A.; Kang, H. C.; Liu, C.; Conley, R.: "Multilayer Laue Lenses as High-resolution X-ray Optics", Proc. SPIE 5539 (2004) 185–194 DOI: 10.1117/12.560046
- [26] Niese, S.; Krüger, P.; Kubec, A.; Braun, S.; Patommel, J.; Schrör, C.; Leson, A.; Zschech, E.: "Full-field X-ray Microscopy with Crossed Par-

tial Multilayer Laue Lenses", Optics Express 22 (2014), 20008–20013 DOI: 10.1364/OE.22.020008

- [27] Zschech, E.; Kutukova, K.; Standke, Y.; Gluch, J.; Gall, M.: "Nondestructive 3D Imaging of Structures and Defects using Laboratory X-ray Tomography", Int. Conf. on Reliability and Stress-related Phenomena in Nanoelectronics IRSP, Singapore (2018)

Bibliography

DOI 10.3139/147.110537

Pract. Metallogr. 55 (2018) 8; page 539–555

© Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG

ISSN 0032–678X

Ehrenfried Zschech



is Department Head for Microelectronic Materials and Nanoanalysis at the Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems in Dresden, Germany, which he joined in 2009. He received his Dr. rer. nat. de-

gree from Dresden University of Technology. Subsequently, Ehrenfried Zschech was project leader in the field of metal physics at Research Institute for Nonferrous Metals in Freiberg and university teacher at Freiberg University of Technology. He spent 17 years in industry, managing the the Metal Physics Group in the development department at Airbus in Bremen and the Materials Analysis Department at Advanced Micro Devices in Dresden. Ehrenfried Zschech holds an adjunct professorship at Warsaw University, Poland, as well as honorary professorships for Nanomaterials at Brandenburg University of Technology Cottbus and for Nanoanalysis at Dresden University of Technology. He is member of the Board of Directors of the Materials Reserach Society (MRS) and Honorary Member of the Federation of the European Materials Societies (FEMS).

Yvonne Standke



is technician in the Department Microelectronic Materials and Nanoanalysis at the Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems in Dresden, Germany, which she joined in 2009. Her work is mainly focused on sample preparation

for TEM and nanoXCT using FIB as well as SEM imaging. Yvonne Standke completed her vocational training as dental technician in 1998, and she worked in a dental lab subsequently. From 1999 to 2009, Yvonne Stadke was Senior Materials Technician in the Materials Analysis Department of Advanced Micro Devices in Dresden, with the main focus on TEM sample preparation and tip fabrication for nano-Raman spectroscopy.