

11 Hochauflösende Tomographie mit Synchrotronstrahlung an Papier

I. Manke, Berlin, Deutschland
A. Haibel, Berlin, Deutschland
A. Rack, Berlin, Deutschland
S. Zabler, Berlin, Deutschland
J. Banhart, Berlin, Deutschland

Inhalt

Mit tomographischen Verfahren lässt sich das Innere eines Materials zerstörungsfrei dreidimensional abbilden. Die Qualität dieser Abbildung ist dabei sehr stark abhängig von den Eigenschaften der eingesetzten Strahlung. Die Röntgenstrahlung eines modernen Elektronenspeicherrings der dritten Generation, wie dem BESSY in Berlin, zeichnet sich durch eine sehr hohe Intensität und Strahlparallelität aus.

Dies ist von entscheidender Bedeutung für Tomographie mit hoher räumlicher Auflösung (1,5 μm Pixelauflösung) und für eine sehr genaue, unverfälschte Abbildung des lokalen Abschwächungskoeffizienten im Material. Letzteres wiederum ist die Voraussetzung für kontrastreiche Bilder zur Unterscheidung von Materialien, die nur einen geringen Absorptionskontrast erzeugen. Gerade bei der Analyse von Papier findet man oft nur geringe Unterschiede zwischen den einzelnen chemischen Bestandteilen. Konventionelle Mikro-Tomographie-Anlagen kommen dabei schnell an ihre Grenzen.

In diesem Beitrag wird eine kurze Einführung in die Tomographie mit Synchrotronstrahlung gegeben. Dabei werden zunächst die Möglichkeiten dieser Methode bei der Materialanalytik anhand verschiedener Beispiele erklärt, bevor einige Anwendungsbeispiele für die Untersuchung von Papieren und vergleichbaren Materialien gezeigt werden.

Dr. Ingo Manke
Hahn-Meitner-Institut
Glienicker Str. 100
14109 Berlin

Deutschland
manke@hmi.de

1 Einleitung

1.1 Allgemeine Vorbemerkungen

Tomographische und radiographische Verfahren geben Aufschluss über die innere Zusammensetzung eines Objekts. Zumeist wird dazu das Objekt durchstrahlt und Veränderungen in den Eigenschaften der Strahlen nach dem Durchlaufen durch das Objekt genutzt, um auf die innere Beschaffenheit zurückzuschließen.

Welcher Art die Informationen sind, die man vom Inneren des Objekts erhält, hängt von der Art der Wechselwirkung der verwendeten Strahlung mit dem Material ab.

In der Regel wird nur die reine Abschwächung der Strahlung gemessen. Der Abschwächungskoeffizient hängt dabei von der Elementzusammensetzung und der Dichte des Materials ab. Ist dieser für zwei verschiedene Materialsorten ähnlich, ergibt sich nur noch ein geringer Kontrast im Tomogramm. Eine möglichst exakte Wiedergabe des Abschwächungskoeffizienten ist daher für die Qualität einer Tomographie entscheidend. Sie hängt sehr stark von den Eigenschaften der eingesetzten Röntgenstrahlung ab (Energiespektrum, Intensität, Strahlparallelität). Konventionelle Mikro-Tomographieanlagen kommen dabei schnell an ihre Grenzen. Für qualitativ besonders hochwertige Bilder wird daher Synchrotronstrahlung eingesetzt.

1.2 Synchrotronstrahlung

Synchrotronstrahlung entsteht bei sehr starker Beschleunigung elektrisch geladener Teilchen. In den großen Elektronenspeicherringen, wie dem BESSY in Berlin (s. Abb. 1), werden dazu Elektronen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Auf diese Weise erhält man unter anderem eine hochintensive Röntgenstrahlung mit stark gebündelten und parallelen Strahlen. Die so genannte Brillanz beschreibt dabei die Qualität eines Strahls. Sie ist definiert als die Zahl der Photonen pro Fläche, Zeit, Raumwinkel und Energieband. Die Brillanz der Synchrotronstrahlung ist um mehrere Größenordnungen besser als in jeder Labor-Röntgenanlage. Gerade für tomographische Untersuchungen sind diese Strahlqualitäten von herausragender Bedeutung.



Abb.1: Elektronenspeicherring BESSY in Berlin

1.3 Vorteile der Synchrotrontomographie gegenüber herkömmlichen Anlagen

Im einzelnen ergeben sich folgende Vorteile gegenüber herkömmlicher Tomographie:

1. Es sind sehr hohe räumliche Auflösungen von hier etwa 1,5 μm möglich
2. Die hohe Intensität liefert sehr rauscharme Bilder in kurzer Zeit. Zudem kann trotz erheblichen Intensitätsverlusts ein monochromatisierter Strahl verwendet werden.
3. Die monochromatische Strahlung ermöglicht eine sehr hohe Wiedergabegenauigkeit der lokalen Abschwächungskoeffizienten, da letzterer von der Energie der Röntgenstrahlung abhängig ist. So ist auch eine bessere räumliche Auflösung unterschiedlicher chemischer Komponenten möglich.
4. Die hohe Intensität steht in einem weiten Energiespektrum (hier: 6–60 keV, s. Abb. 2) zur Verfügung und ermöglicht eine gezielte Anpassung an die Eigenschaften des zu untersuchenden Objekts.

Diese Eigenschaften sind insbesondere bei der Untersuchung von organischen Materialien, wie Papier, von Vorteil. Zum einen kann man im niederenergetischen Bereich eine optimale Energie auswählen. Zum anderen hat man gerade in organischen Materialien oft nur geringe Kontrastunterschiede, die sich besser sichtbar machen lassen.

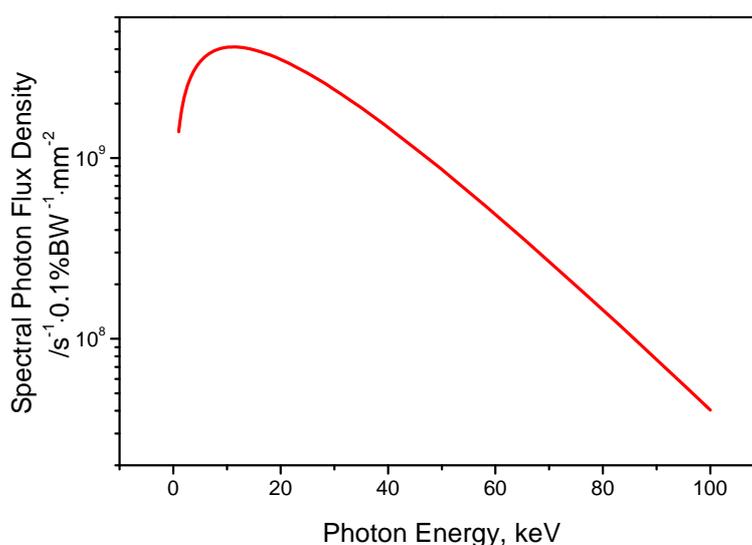


Abb. 2: Kontinuierlich hoher Photonenfluss über einen weiten Energiebereich an der Synchrotron-Tomographieanlage an der BAMline am BESSY.

1.4 Prinzip der Tomographie

Bei der Radiographie wird ein Objekt durchstrahlt und dabei eine Projektion erzeugt, die die Stärke der Absorption an verschiedenen Stellen abhängig von der Materialdicke und -art widerspiegelt. Zur Erzeugung eines Tomogramms, wird das Objekt zunächst auf einem drehbaren Tisch montiert und schrittweise gedreht [1,2]. Für jede Winkelposition wird dabei jeweils ein Radiogramm erstellt, bis ein Winkelbereich von 180° bzw. 360° abgedeckt ist (Abb. 3). Zumeist sind mehrere hundert bis über tausend Einzelbilder nötig. Dies dauert etwa

zwischen einer halben und einigen Stunden und erzeugt, abhängig von der gewünschten Auflösung, Datenmengen von vielen Gigabyte.

Aus den Radiogrammen wird dann mit einem mathematischen Verfahren ein dreidimensionales Bild rekonstruiert, das Tomogramm. Es stellt die räumliche Verteilung des lokalen Abschwächungskoeffizienten innerhalb des untersuchten Objekts dar.

Mit geeigneten Softwarealgorithmen lassen sich dann wichtige Gefügekenngößen, wie Anteil, Größe, Form und Verteilung von unterschiedlichen chemischen Bestandteilen, Einschlüssen, Poren, etc. quantitativ ermitteln und vergleichen.

Da es sich hier um eine zerstörungsfreie Untersuchung des Objekts handelt, ist es auch möglich, Veränderungen (z.B. nach weiteren Materialbearbeitungsschritten) am selben Objekt zu untersuchen. Außerdem steht die Probe für weitere Analysen zur Verfügung.

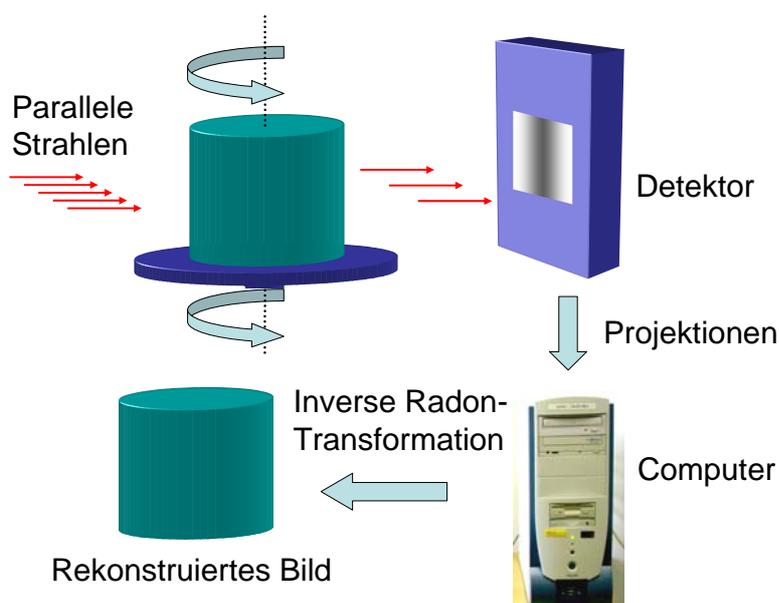


Abb. 3: Prinzip der Tomographie

1.5 Technische Parameter der Messanlage am Elektronenspeicherring BESSY

Sofern nicht anders angegeben, wurden die hier gezeigten Anwendungsbeispiele an der BAMline am Elektronenspeicherring BESSY in Berlin durchgeführt (s. Abb. 4) [3]. Diese Anlage wird gemeinsam von der Abteilung SF3 des Hahn-Meitner-Instituts Berlin (AG Prof. Banhart) und der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) genutzt. Die Energie der Röntgenstrahlung lässt sich im Bereich zwischen 6 und 60 keV einstellen. Die Energieauflösung beträgt ca. 1,5 % und die Photonenflussdichte bis zu 10^{12} Photonen/(mm^2s).

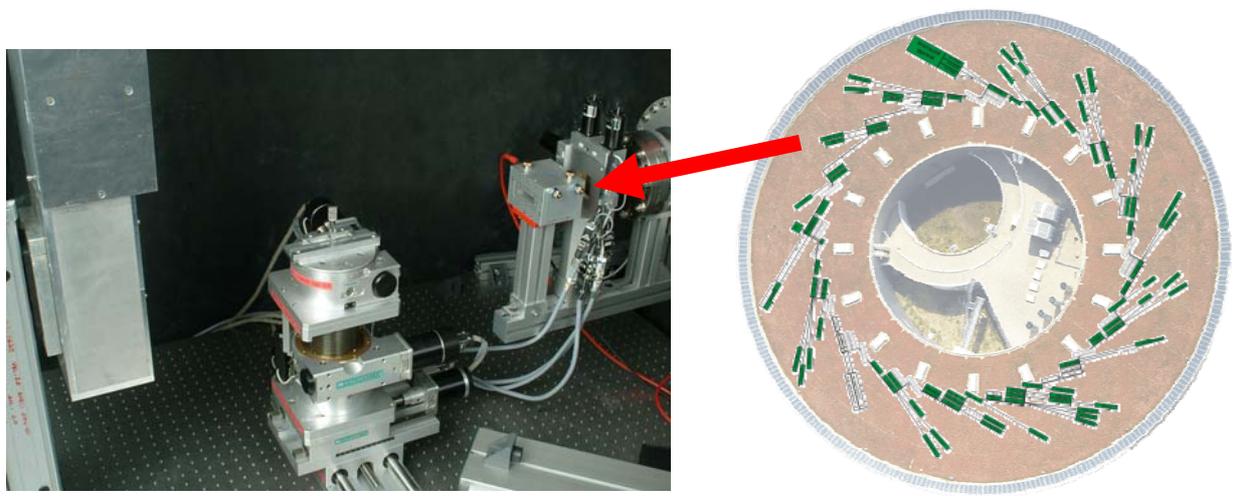


Abb. 4: Tomographie-Messplatz des Hahn-Meitner-Instituts Berlin

Es wird ein Kamerasystem mit 2048x2048 Pixel eingesetzt. Bei der besten möglichen Auflösung von 1,5 μm lassen sich so noch Objekte mit einem maximalen Durchmesser von 3 mm untersuchen. Die Auflösung ist dabei energieabhängig und verringert sich bei höheren Röntgenenergien.

Es stehen noch zwei weitere Einstellungen für größere Objekte zur Verfügung: 3,5 μm Auflösung für Objekte mit bis zu 7 mm Durchmesser und 7 μm Auflösung für Objekte mit bis zu 14 mm Durchmesser.

2 Anwendungsbeispiele

Im Folgenden werden anhand einiger Beispiele die Möglichkeiten der Synchrotrontomographie verdeutlicht. Zur Veranschaulichung grundlegender Analysemöglichkeiten werden zunächst einige allgemeine Beispiele gezeigt, bevor dann mit konkreten Anwendungen für die Analyse von Papieren und Faserstoffen fortgefahren wird.

2.1 Allgemeine Anwendungsbeispiele

2.1.1 Darstellung unterschiedlicher chemischer Bestandteile

Abbildung 5 (rechtes Bild) zeigt ein Tomogramm eines Aluminium-Materials mit eingebetteten SiC- und TiH₂-Partikeln [4,5]. Die drei Bestandteile haben verschiedene Abschwächungskoeffizienten und lassen sich daher voneinander separieren. Die einzelnen Komponenten sind dabei farblich gekennzeichnet. Blau ist das Aluminium-Matrix-Material, grün das SiC und rot das TiH₂. Zusätzlich sind noch Poren im Material zu finden, die transparent dargestellt sind. In den beiden rechten Bildern in Abbildung 5 sind die Verteilungen der SiC und TiH₂ noch einmal separat dargestellt, während die jeweiligen anderen Bestandteile transparent sind. Dies ermöglicht es, die Verteilungen der einzelnen Materialbestandteile getrennt voneinander zu analysieren und quantifizieren.

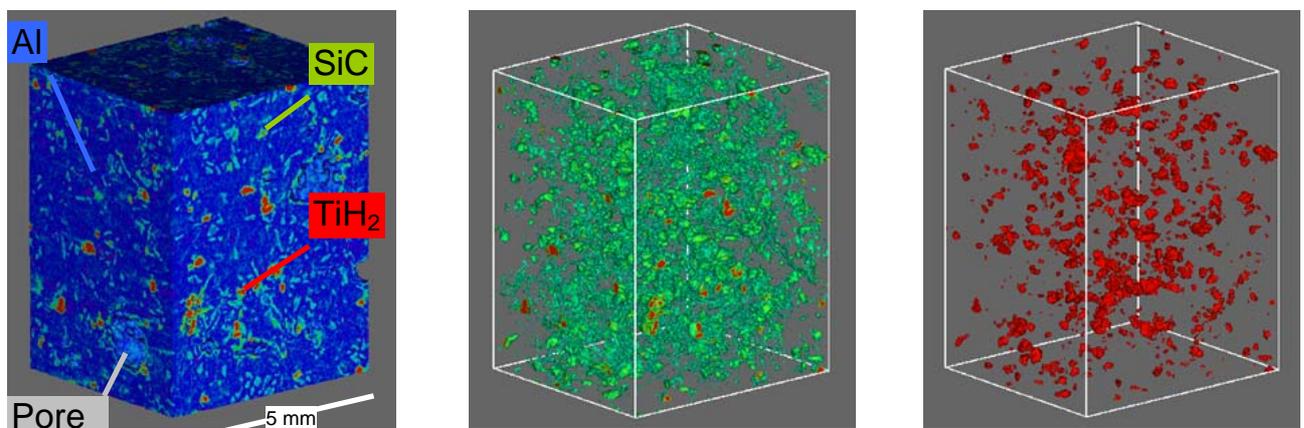


Abb. 5: Tomogramm eines Metallschaumvormaterials aus Aluminium mit eingelagerten SiC- und TiH₂-Partikeln.

2.1.2 Analyse der Größenverteilungen von Partikeln

Mit spezieller Software lassen sich aus den Tomogrammen quantitative Werte für die Größenverteilungen einzelner chemischer Bestandteile ermitteln. Das Beispiel in Abbildung 6 zeigt einen Querschnitt aus einem Tomogramm einer handelsüblichen Alkaline Batterie. Im Inneren befinden sich Zink-Partikel, die sich bei der Entladung in ihrer Anzahl und Größe verändern [6]. Im rechten Bild ist die Größenverteilung dieser Partikel für einen bestimmten Entladungszustand gezeigt. Die Partikelgrößen liegen etwa zwischen 40 und 120 µm mit einem Maximum bei 70 µm.

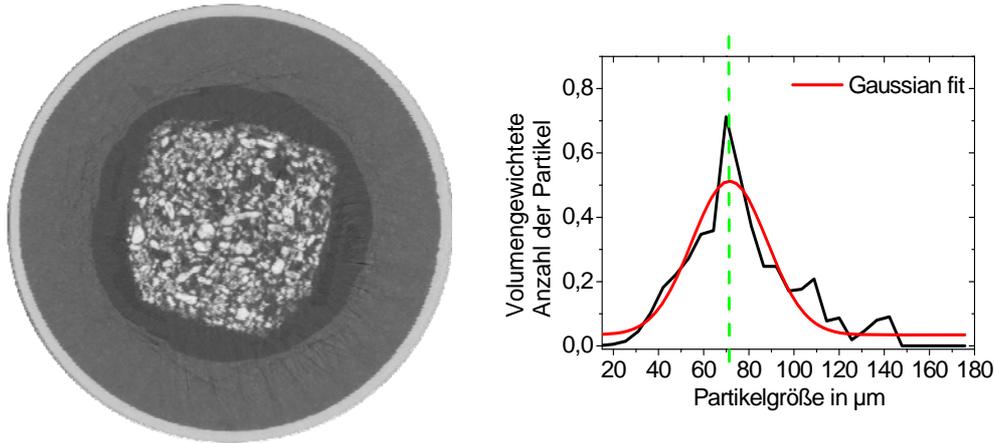


Abb. 6: Querschnitt aus dem Tomogramm einer Alkaline Batterie (links) und Größenverteilung der Zinkpartikel (rechts)

2.1.3 Analyse des räumlichen Verlaufs einer Struktur

Hier wurde ein Riss in einem Granitstein tomographiert (s. Abb. 7 links). Durch Ausblendung des Gesteinmaterials lässt sich der Riss in seiner dreidimensionalen Struktur analysieren. Seine räumliche Ausbreitung ist dabei ebenso zu sehen, wie seine Oberflächenbeschaffenheit (s. Abb. 7 rechts). Es lässt bestimmen, ob der Riss z.B. an einer Pore beginnt und, ob er entlang der Korngrenzen verläuft.

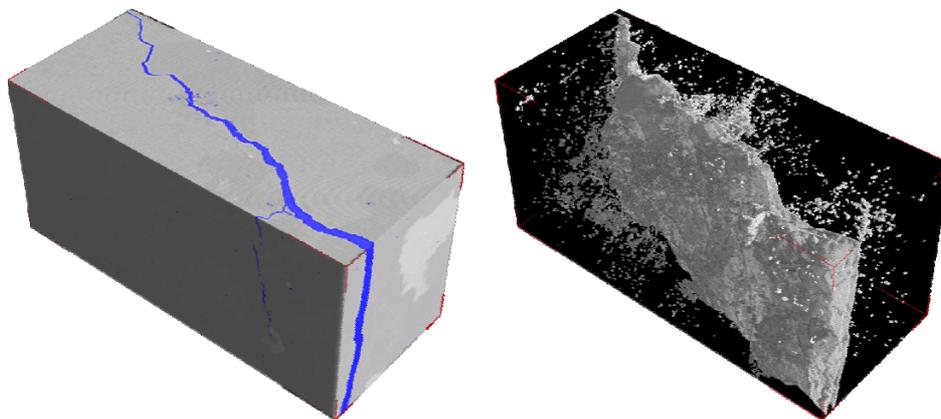


Abb.7: Rechts: Tomogramm eines Risses in einem Gestein, Links: Oberfläche des Risses

2.2 Papiere und andere Fasermaterialien

2.2.1 Synchrotron-Tomographie an Kartonpapier

Dieses Beispiel zeigt Untersuchungen am Material eines gestrichenen Faltschachtelkartons. Hintergrund der Fragestellung war die Visualisierung von Faserstrukturen und Papierinhaltsstoffen sowie die Untersuchung des Anstrichs.

In Abbildung 8 ist das aufgeschnittene Tomogramm einer etwa 2,5 mm breiten Probe zu sehen. Die Beschichtung (heller oberer Bereich) hebt sich sehr deutlich vom restlichen Teil ab.

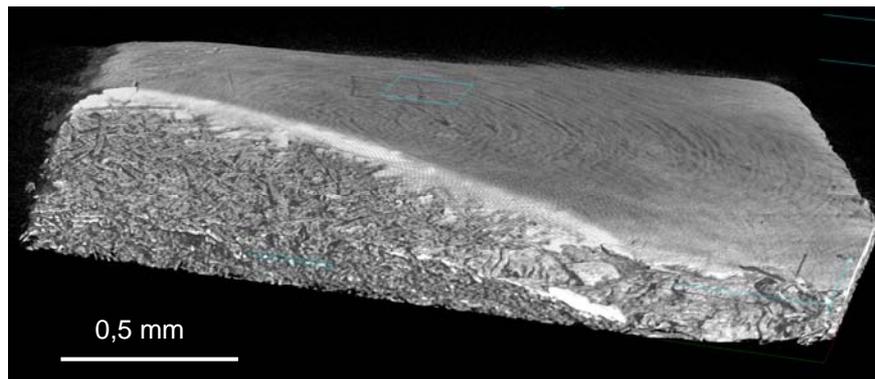


Abb. 8: Tomogramm einer Probe eines gestrichenen Faltschachtelkartons

In den Querschnitten aus dem Tomogramm (s. Abb. 9) sind sehr deutlich die einzelnen Fasern und deren Verlauf zu erkennen. Viele der Fasern sind fast parallel zur Oberfläche ausgerichtet, weshalb sie bei diesem Querschnitt entlang ihrer Längsseite geschnitten werden und ihr Verlauf in der Ebene sichtbar wird. Sie sind nur stellenweise parallel ausgerichtet und zeigen ein eher ungeordnetes Muster.

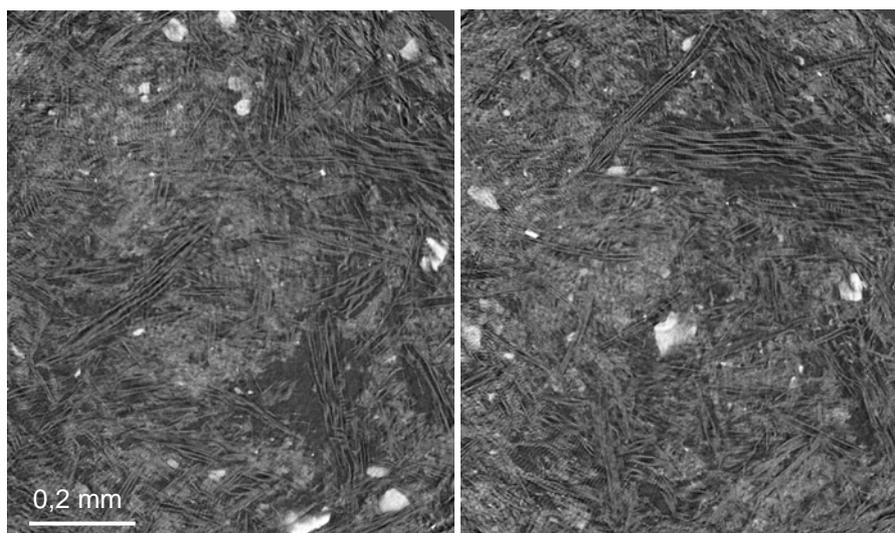


Abb. 9: Horizontale Querschnitte aus dem Tomogramm aus Abbildung 8

Die Fasern sind innen hohl, so dass scheinbar immer zwei oder mehr Fasern gemeinsam durch die Ebene laufen. Es handelt sich aber nur um die Ränder einzelner Fasern mit einer komplexen Gewebestruktur. In dem Querschnitt senkrecht zur Oberfläche (s. Abb. 10) erscheinen die Fasern daher als miteinander verbundene Ringe, ähnlich einer Wabenstruktur. Dies ist vor allem in der Ausschnittsvergrößerung in Abbildung 10 deutlich zu erkennen. Quantitative Analysen, wie etwa die Berechnung der Richtungsverteilungen der Fasern, sind möglich, erfordern allerdings sehr aufwändige Softwarealgorithmen.

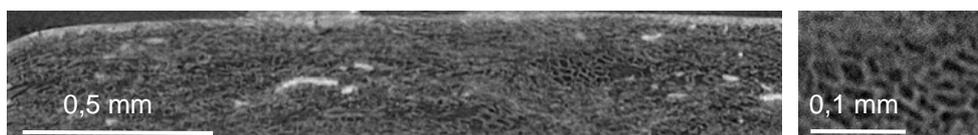


Abb. 10: Querschnitt senkrecht zur Oberfläche aus dem Tomogramm aus Abbildung 8. Das rechte Bild zeigt eine Ausschnittsvergrößerung aus dem linken

2.2.2 Verteilung von Papierinhaltsstoffen

Zusätzlich zu den Fasern sind in Abbildung 9 einzelne Einschlüsse aus einem Material mit deutlich höherem Abschwächungskoeffizienten zu erkennen.

Die räumliche Verteilung dieser Einschlüsse sind in Abbildung 11 noch einmal separat ohne das umgebende Matrixmaterial dargestellt. Hierin lässt sich erkennen, dass diese nicht gleichmäßig verteilt sind und teilweise Agglomerationen bilden. Mit entsprechender Software lassen sich nun Parameter wie Anzahl, Volumenanteil oder Größenverteilung der Einschlüsse berechnen (hier nicht gezeigt).

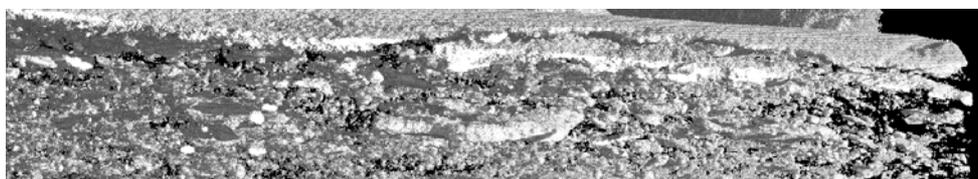


Abb. 11: Ausschnittsvergrößerung aus Abbildung 8. Es sind nur die hochabsorbierenden Bestandteile abgebildet, die umgebende Matrix ist transparent dargestellt.

2.2.3 Papierbeschichtungen

Das in Abbildung 8 gezeigte Papier besitzt eine Oberflächenbeschichtung, deren Homogenität untersucht wurde. Der Anstrich besteht aus einer komplexen Mischung aus Carbonat, Kaolin und einem Binder.

In dem Querschnitt in Abbildung 12 ist der Verlauf des Anstrichs entlang der Oberfläche zu sehen. Die Schichtdicke zeigt starke Schwankungen im Bereich zwischen 7 μm und 40 μm . Die Auflösung erlaubt es hier allerdings nicht feinere Strukturen in diesen Schichten abzubilden, wie etwa bei der Elektronenmikroskopie. Dafür lässt sich die Schicht über den gesamten untersuchten Bereich im Papier in beliebigen Querschnitten analysieren.

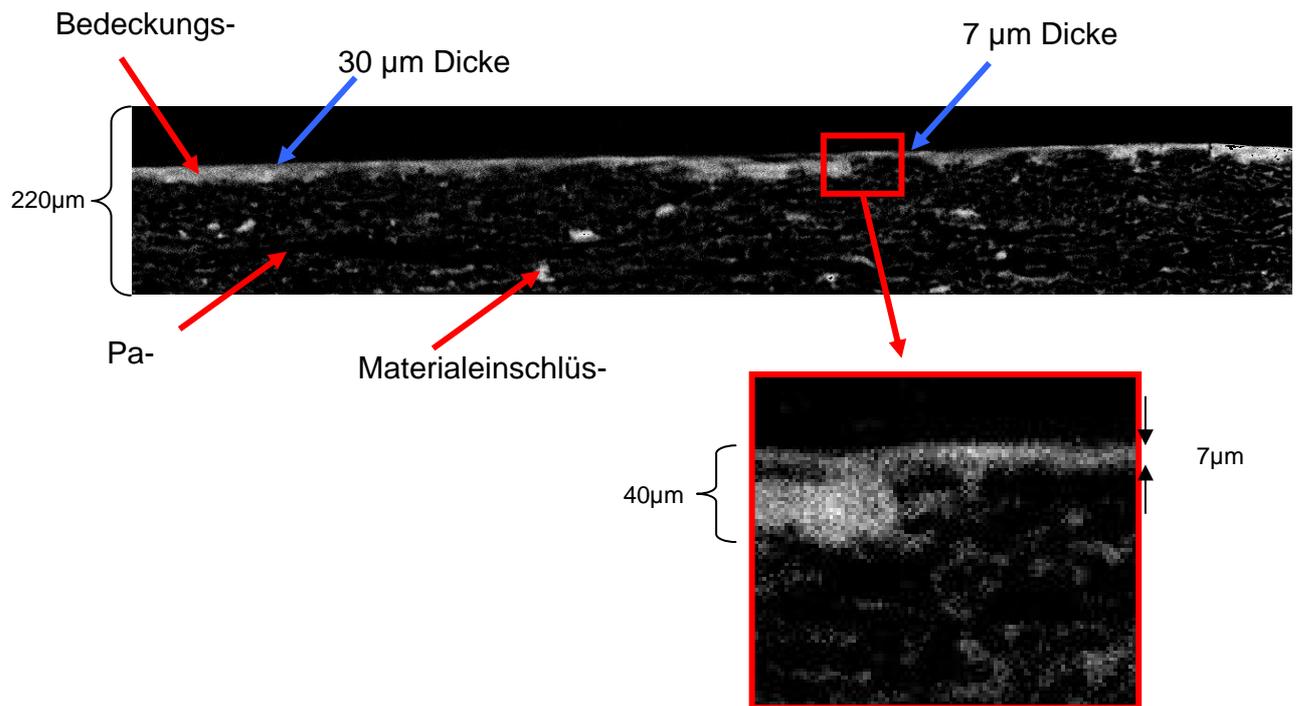


Abb. 12: Beschichtete Papieroberfläche. Querschnitt aus einem Tomogramm senkrecht zur Oberfläche des Papiers.

2.2.4 Analyse von Mehrschichtstrukturen

Dieses Wärmedämmmaterial besteht aus insgesamt 17 alternierenden Schichten, die nacheinander aufgebracht wurden. Sie haben einen Abstand von 40 µm zueinander. Mit der Synchrotrontomographie können Unregelmäßigkeiten in den Lagen nachgewiesen werden. In dem Querschnitt aus dem Tomogramm in Abbildung 13 ist zu erkennen, dass diese zum Teil nicht parallel zueinander verlaufen und stellenweise Material fehlt.

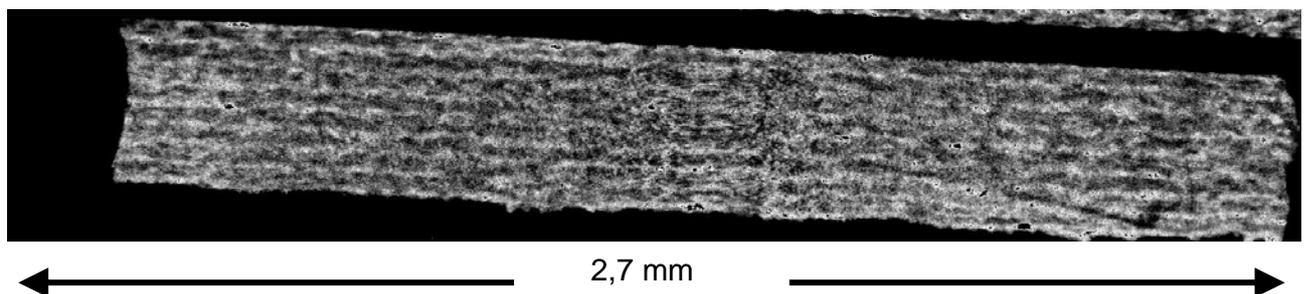


Abb. 13: Tomogramm-Querschnitt eines mehrlagigen Wärmedämmschichtmaterials

2.2.5 Untersuchung von Fasern

Als weiteres Beispiel wird hier ein Fasermaterial aufgeführt, welches für spezielle Anwendungen in der Industrie genutzt wird (s. Abb. 14). Das Interesse fokussierte sich dabei auf

PTS

die Analyse des Verlaufs und der Beschaffenheit der Fasern. Der Durchmesser der Fasern lag bei ca. 10 μm .

In den vergrößerten Ausschnitten in Abbildung 15 sind sogar die Enden einiger Fasern im Material zu sehen.

Aus dem Tomogramm ließ sich auch die Porosität des Materials bestimmen. Sie ist inhomogen verteilt und beträgt zwischen 60 und 80 Prozent.

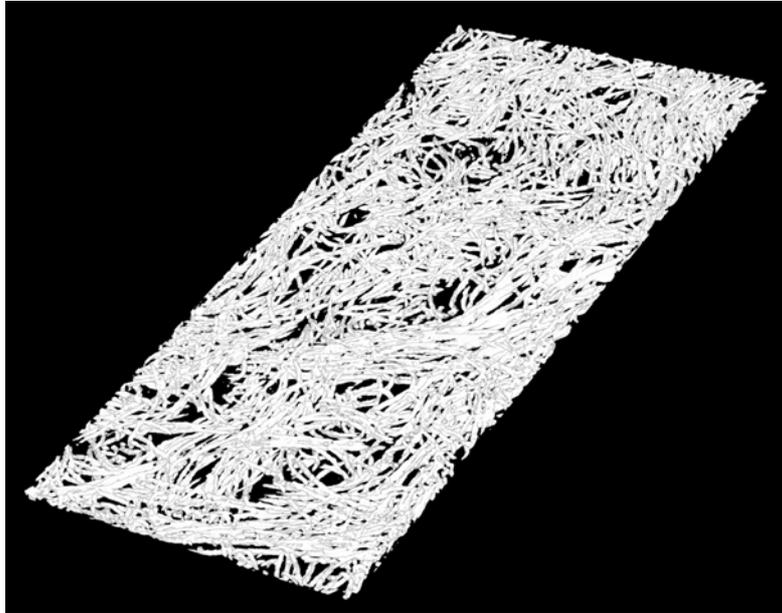
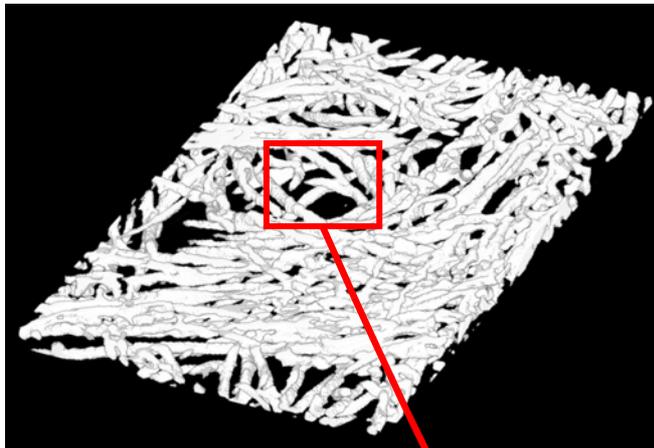


Abb. 14: 3D-Ausschnitt aus einem Tomogramm eines Fasermaterials
(Maße: 900 x 1770 x 26 μm^3)



Maße: 450 x 525 x 26



Maße: ca. 100 μm x 100 μm x 26 μm^3

Abb. 15: Ausschnittsvergrößerung aus Abbildung 14

2.2.6 Eindringverhalten von Klebstoffen in Fasermaterialien

Auch dieses Beispiel zeigt ein Fasermaterial. Die Fragestellung war hier das Eindringverhalten eines Klebstoffes zu visualisieren und quantifizieren.

Abbildung 16 zeigt zwei Querschnitte aus dem Tomogramm. Da die meisten Fasern in der Schnittebene liegen, ist deren Verlauf sehr deutlich zu erkennen. Im rechten Bild ist an der linken Seite der Klebstoff zu erkennen, der den Raum zwischen den Fasern praktisch vollkommen ausfüllt.

In dem Querschnitt senkrecht zur Oberfläche (Abb. 17) werden die Fasern quer geschnitten und erscheinen daher als kleine Kreisflächen. Die obere Fläche ist vom Klebstoff bedeckt, der verschieden tief in das Material eindringt. Verteilung und Eindringtiefe des Klebers sind nicht gleichförmig. Die Eindringtiefe liegt zwischen 20 und 120 μm .

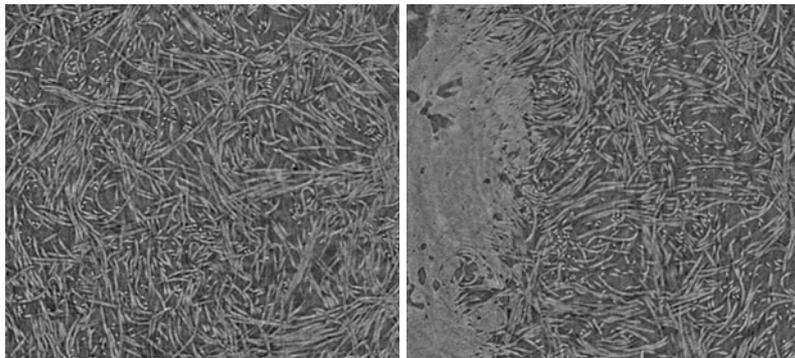


Abb. 16: Querschnitte aus einem Tomogramm: Reines Fasermaterial (links) und in die Fasern eingedrungener Klebstoff (rechts)

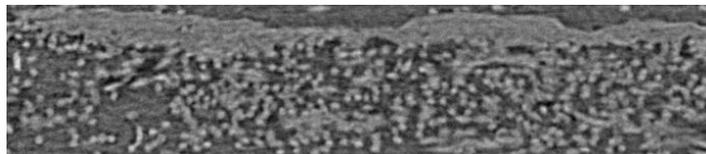


Abb. 17: Eindringen eines Klebstoffes in ein Fasermaterial

2.2.7 Schädigungsverhalten in Klebebändern unter Zugbelastung

Das letzte Beispiel zeigt die Untersuchung eines Klebebands. Dieses enthält neben homogenen Teilen auch einzelne Schichten von Fasern, die zur Verstärkung in das Material eingebracht wurden. In dem Querschnitt in Abbildung 18 links sind diese gut zu erkennen.

Je nach dem welcher Belastung das Material zuvor ausgesetzt war, findet man unterschiedliche Schädigungsstrukturen im Materialverbund zwischen Faser und Matrix. Da die Tomographie eine zerstörungsfreie Untersuchungsmethode ist, lassen sich Veränderungen am selben Objekt vor und nach Belastung analysieren und miteinander vergleichen (hier nicht gezeigt).

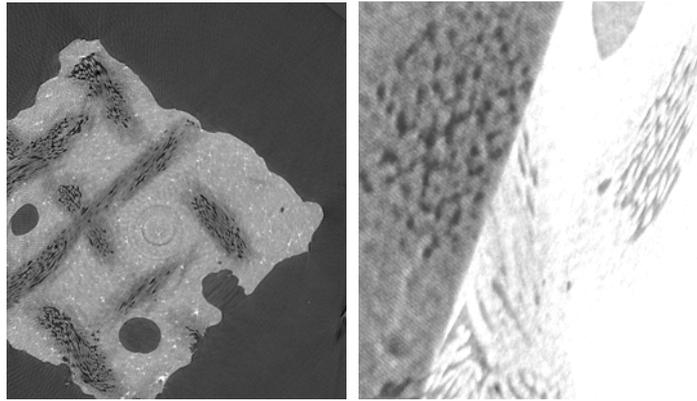


Abb. 18: Querschnitt aus einem Tomogramm eines Klebebands (links) und Ausschnittvergrößerung aus dem Tomogramm (rechts)

3 Weitere tomographische Untersuchungsverfahren

3.1 Phasenkontrast-Tomographie

Bei der Durchdringung eines Objekts erfahren die Röntgenstrahlen nicht nur eine Abschwächung ihrer Intensität, sondern auch eine Veränderung ihres Phasengangs. Bei großer Kohärenz der Strahlenquelle, wie bei einem Synchrotron, führt dies zu Interferenzeffekten in den Radiogrammen, wenn der Abstand zwischen Detektor und Probe vergrößert wird [7-11]. Die Interferenzen führen meistens zu starken Intensitätsschwankungen bzw. -überhöhungen an den Grenzflächen zwischen zwei verschiedenen Materialkomponenten. Diese Randüberhöhungen lassen sich ausnutzen, um bei schwachem Absorptionskontrast eine Phasenkontrast-Tomographie zu erzeugen. In dieser sind praktisch nur noch die Grenzflächen zwischen unterschiedlichen Materialien zu sehen.

Zur Veranschaulichung ist hier eine Beispielmessung an einem Testobjekt aus Polymerkugeln (s. Abb. 19) gezeigt [7]. In dem Bild mit Abschwächungskontrast ist der Absorptionskontrast gering, so dass die Konturen der Kugeln nur schwer zu erkennen sind. Im Phasenkontrast-Radiogramm dagegen treten die Grenzflächen sehr deutlich in Erscheinung.

Die Randüberhöhungen wirken sich allerdings oft auch störend auf das Tomogramm aus, insbesondere dann, wenn weitere Bestandteile im Material sind, die sich deutlich stärker im Abschwächungskoeffizienten vom Rest unterscheiden. Auch wird eine quantitative Auswertung des Tomogramms erschwert. Dieses Problem kann aber mit der Holo-Tomographie beseitigt werden (s. nächsten Abschnitt)

3.2 Holo-Tomographie

Phasenkontrast-Bilder sind keine projizierten Bilder der Phasenverschiebung, wie im Falle der reinen Röntgen-Absorptions-Bilder, sondern Hologramme, in welchen sich Phasen- und Absorptionseffekte mischen. Um nun Absorption und Phasenverschiebung zu trennen und um letztere aus den komplizierten Interferenzen zu extrahieren, verwendet man einige spezielle Algorithmen. Diese berechnen das „echte“ Phasenbild aus einigen wenigen (zwei bis vier) Phasenkontrast-Bildern. Aus den „echten“ Phasenbildern lässt sich dann ein Tomogramm erzeugen, mit dem gegenüber herkömmlicher Absorptionstomographie ein Kontrastgewinn von 50-4000 erzielt wird (abhängig von Material und Wellenlänge des Röntgenlichts).

Dies ist in dem Beispiel in Abbildung 19 gezeigt, wo zum Vergleich noch einmal ein Bild mit rekonstruierter Projektion der Phasenverschiebung zu sehen ist.

Der mit einer Holo-Tomographie verbundene Aufwand und die Kosten dafür sind um einen Faktor 2-4 höher als bei einer Tomographie mit Abschwächungs- oder Phasenkontrast. Der Aufwand kann sich aber in Einzelfällen lohnen.

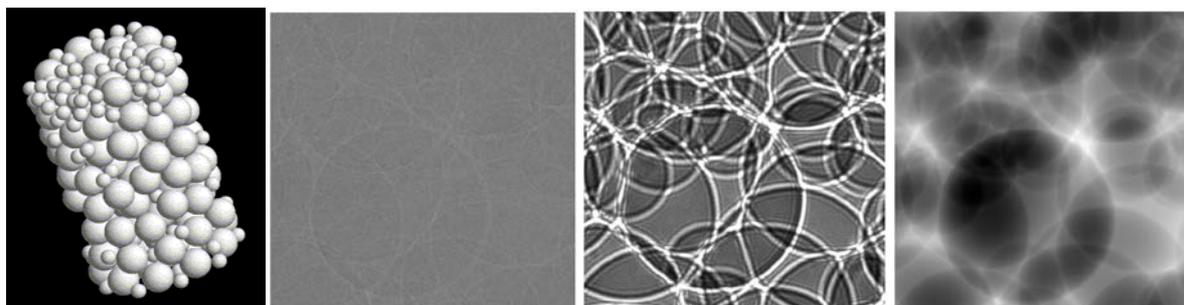


Abb. 19: Von links nach rechts: Testobjekt aus Polymerkugeln, Radiogramme des Testobjekts mit Abschwächungskontrast, mit Phasenkontrast und mit rekonstruierter Projektion der Phasenverschiebung (Die Messungen wurden durchgeführt am ESRF, ID 19).

3.3 Neutronen-Tomographie

Statt der Röntgenstrahlung lassen sich auch Neutronen zur Tomographie nutzen. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass sie sehr sensitiv auf einzelne Elemente, wie z.B. Wasserstoff reagieren [12]. Daher lassen sich mit Neutronen sehr gut Feuchtigkeitsverteilungen oder Trocknungsprozesse sichtbar machen. Dies ist auch in Papier oder Holzwerkstoffen möglich, obwohl das Matrixmaterial bereits viel Wasserstoff enthält.

Da Neutronen von dem Wasserstoff-Isotop Deuterium weit weniger stark abgeschwächt werden als von Wasserstoff, gibt es die Möglichkeit durch Austausch von leichtem gegen schweres Wasser einen „künstlichen“ Kontrasteffekt zu erzeugen.

Der entscheidende Nachteil der Neutronen-Tomographie liegt allerdings in der vergleichsweise geringen räumlichen Auflösung von 100 μm .

4 Zusammenfassung und Ausblick

Hochauflösende Tomographie mit Synchrotronstrahlung ermöglicht es Strukturen in Papier und vergleichbare Materialien mit hoher räumlicher Auflösung (1,5 μm) und Qualität dreidimensional und zerstörungsfrei abzubilden. Die einzelnen Papierinhaltsstoffe lassen sich zumeist voneinander separieren und analysieren. Bei sehr geringem Absorptionskontrast kann zusätzlich Phasenkontrast-Tomographie eingesetzt werden, mit der die Grenzflächen zwischen unterschiedlichen Materialkomponenten dreidimensional abgebildet werden.

Ob eine Untersuchung zum Erfolg führt, lässt sich im Einzelfall am besten mit einer Testmessung feststellen, da zumeist die chemische Zusammensetzung der Papierinhaltsstoffe und deren Materialdichten nicht hinreichend genau bekannt sind.

Die Verwendung der Synchrotron-Tomographie in der Papierindustrie ist noch relativ jung und der Bekanntheitsgrad noch eingeschränkt. Gerade die technischen Verbesserungen der letzten Jahre haben das Potential dieser Technik aber erheblich vergrößert, da erst jetzt die Qualität der Abbildungen und die Kosten für Hardware zur Messung und Auswertung der großen Datenmengen in einem ökonomisch interessanten Verhältnis liegen.

So ist es möglich Synchrotron-Tomographie auch einem breiten Anwenderkreis in der Industrie zur Verfügung zu stellen. Der geringfügig höhere Aufwand gegenüber konventionellen Mikro-Tomographie-Untersuchungen ist durch die erheblich bessere Bildqualität mehr als gerechtfertigt.

5 Literaturverzeichnis:

- [1] A. C. Kak, M. Slaney, Principals of Computerized Tomographic Imaging, IEEE Press, New York, 1987
- [2] G. T. Herman, Image Reconstruction from Projections: The Fundamentals of Computerized Tomography, Academic Press, New York, 1980
- [3] I. Manke, N. Kardjilov, R. Schneider, A. Haibel, A. Denker, A. Rack, A. Hilger, F. García Moreno, J. Banhart, Zerstörungsfreie Messmethoden am Hahn-Meitner-Institut: Neutronen, Ionen und Röntgenstrahlen für die Industrie. Materialprüfung 46, 414-413 (2004)
- [4] A. Haibel, J. Banhart, Synchrotron-Tomography on Metallic Foams, Proceedings of the International Symposium on Computed Tomography and Image Processing for Industrial Radiology (2003)
- [5] A. Rack; A. Haibel; B. Matijasevic, J. Banhart, Synchrotron-Tomography on zinc and aluminium foams Cellular Metals, Proceedings of the 3rd International conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology (MetFoam 2003)
- [6] A. Haibel, I. Manke, A. Rack, A. Melzer, J. Banhart, Discharging Investigations of Alkaline Batteries by means of In-Situ Synchrotron Tomography, Journal of Power Resources, to be published
- [7] S. Zabler, Diplomarbeit, Bildgebende Verfahren im Phasenkontrast und Holographie mit Hilfe harter Röntgenstrahlen: Optimierung und Anwendungen, Universität Karlsruhe, Februar 2003, (Paper submitted at Review of Scientific Instruments, Februar 2005)
- [8] E.J. Samuelsen, Ø.W. Gregersen, P.J. Houen, T. Helle, C. Raven, A. Snigirev, Three-dimensional imaging of paper by use of synchrotron x-ray microtomography, Journal of Pulp and Paper Science, 27(2): 50-53
- [9] A. Snigirev, I. Snigireva, V. Kuznetsov, I. Schelokov, On the possibility of X-ray Phase Contrast Microimaging by Coherent High-Energy Synchrotron Radiation, rev. Sci. Instrum. 66:5486-6492 (1995)
- [10] C. Raven, A. Snigirev, I. Snigireva, P. Spanne, A. Souvorov and V. Kohn, Phase Contrast Microtomography with Coherent High-Energy Synchrotron X-Rays, Appl. Phys. Lett. 69:1826-1828 (1996)
- [11] P. Cloetens, R. Barrett, J. Baruchel, J.P. Guigay, M. Schlenker, Phase objects in synchrotron radiation hard x-ray imaging, Journal of Physics D-Applied Physics 29:133-146 (1996)
- [12] N. Kardjilov, Further developments and applications of radiography and tomography with thermal and cold neutrons, Dissertationsschrift (2003), <http://tumb1.biblio.tu-muenchen.de/publ/diss/ph/2003/kardjilov.pdf>