Mobiler 3D Tomograph

Bernhard ILLERHAUS, Jürgen GOEBBELS, Yener ONEL,
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
Christoph SAUERWEIN, RayScan Technologies, Meersburg

Kurzfassung. Bei einem mobilen Aufbau eines Tomographen, ergibt sich oft das Problem, daß Standort oder Aufbau des Geräts eine hohe Ortsauflösung nicht zulassen. Obwohl sich der von der Fa. Isotopenforschung Dr. Sauerwein GmbH entwickelte Baumtomograph in der Praxis bewährte [1], kommt er heute nicht mehr zum Einsatz, da die zu erreichende Ortsauflösung und die Meßzeit für viele Fragestellungen heute als nicht mehr zeitgemäß erscheint. Wir zeigen hier, daß die mechanische Grundlage ausreicht, um 3D-CT Messungen mit neuen Detektoren und Röntgenröhren durchzuführen. CT Messungen mit sehr guter Statistik benötigen weniger als 10min. Untersuchungen z. B. an nicht transportablen Kulturgütern sind so vor Ort möglich [2].
Einer darüber hinaus gehenden Erhöhung der Ortsauflösung bei einem mobilen Tomographen, der in jeder Raumlage messen kann, steht jedoch eine Bewegung relativ zum Objekt, auf Grund der sich bewegenden Teile des Tomographen und der damit verbundenen Gewichtsverlagerung, entgegen. Anhand von Tomographien, deren Ortsauflösung weit oberhalb der mechanischen Genauigkeit liegt, wird ein Korrekturverfahren zur direkten Integration in den Feldkampalgorithmus vorgestellt.

Einführung

Im Gegensatz zu den medizinischen Tomographen wird im industriellen Einsatz der ortsfeste Aufbau von Detektor und Röhre bevorzugt. Entweder sind die hier verwendeten Röntgenröhren zu groß, bis hin zum Linearbeschleuniger, oder die geforderte Genauigkeit im Aufbau einer µCT kann leichter mit einem rotierenden Objekt erreicht werden. Für zwei bestimmte Klassen von Objekten bietet dieses Verfahren aber keine befriedigende Lösung: Objekte die nicht bewegt werden können, sowie Objekte, die eine Ortsauflösung über die mechanische Genauigkeit des Manipulationssystems hinaus erfordern, oder sogar beides zusammen. Was kann mit heute vorhandenen Geräten gemessen werden und wo ist eine Weiterentwicklung erforderlich?

Stand der Technik

Die erste Variante für einen mobilen Tomographen baut auf dem MCT3 auf, einem leichten, zerlegbaren Gerät mit einem Ringdurchmesser von 80cm (Abb. 1). Ausgerüstet war der Tomograph mit einer Isotopenquelle und drei oder fünf Einzeldetektoren. Damit wurden 2D-Bilder im Translations-Rotations-Modus gemessen, wobei die Genauigkeit für große Objekte mit einer Pixelgröße von ca. 1mm ausgelegt war. Für den jetzigen Test wurde die Quelle durch eine 160kV (bis 2mA) Minifokusröhre mit einem wohldefinierten Brennfleck (0,1mm nach alter Norm, ohne eine Schulter zu haben) ersetzt. Die bessere Alternative ist hier eine bipolare Röhre mit 240kV. Einerseits limitiert die Energie die Dicke

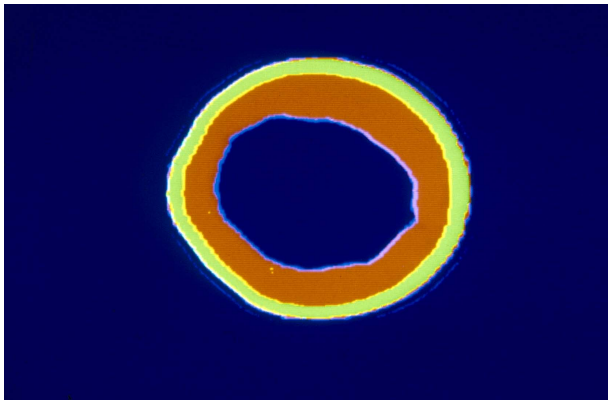

Abb. 1: MCT3 bei der Rohrleitungsprüfung, links Aufbau, oben ein Querschnittsbild der Leitung mit internen Ablagerungen in Falschfarbendarstellung.

des zu untersuchenden Objekts, andererseits behindert das dicke Hochspannungskabel der alten Röhre die Drehbewegung. Zwei dünne moderne Kabel wären hier wesentlich besser. Als Detektoren standen ein Flachdetektor mit 256 x 256 Pixel, 0,8mm Pixelgröße (wegen der Vergrößerung entspricht dies einer Voxelgröße von 0,4mm im CT-Bildmittelpunkt), und ein Flachdetektor mit 512 x 512 mit 0,4mm zur Verfügung (Abb.2). Als Testobjekt wurde ein Detail aus einem Marmorrelief verwendet, das durch starke Hitzeeinwirkung geschädigt war (Durchmesser ca. 10cm). Die Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse, jeweils im senkrechten Schnitt der Tomogramme. Der 512er Detektor zeigte eine deutliche Verbesserung in der Abbildungsschärfe, die innenliegenden Rißsysteme im rechten Schulterbereich sind hier schärfer gezeichnet. In der 512er Rekonstruktion gibt es keine Anzeichen dafür, daß es zu einer Bildunschärfe aufgrund einer ungewollten Bewegung des CT-Systems kam. Damit kann also eine Ortsauflösung von ca. 0,2mm im Bild erreicht werden. (Meßbedingungen: Detektorgröße 512 x 512, 1500 Winkel je 4x0,4sec, 40min Meßzeit., 0,3mA, 155kV). Weitere Objekte, die mit diesem Tomographen gut geprüft werden

Abb. 2: Umrüstung des MCT3 mit Röntgenröhre und Flachdetektor.

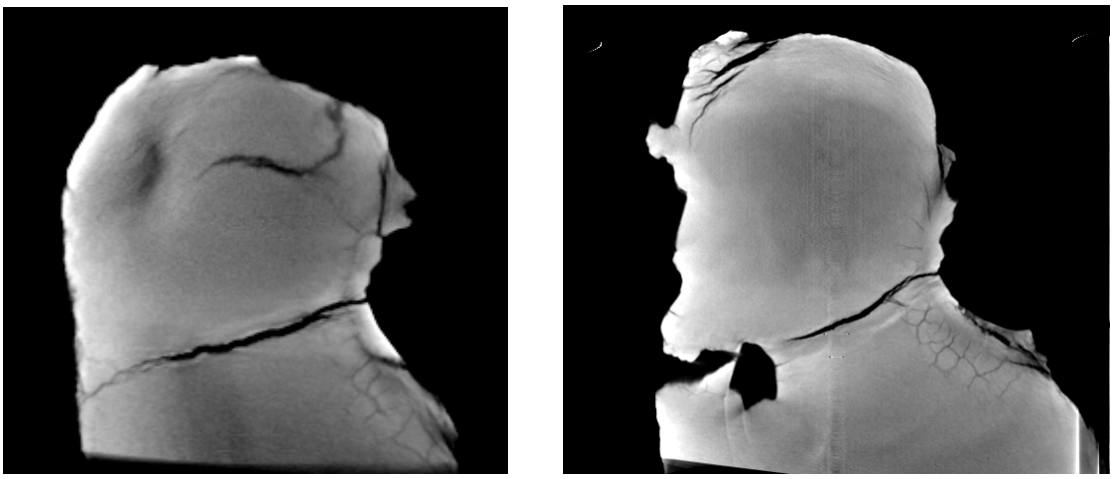

Abb. 3: Detail eines Marmorreliefs mit Schäden nach Hitzeeinwirkung, senkrechter CT-Schnitt durch das Objekt. Links mit einem 0,8mm Pitch, rechts mit einem 0,4mm Pitch Detektor, Schnitte in nicht identischer Lage.

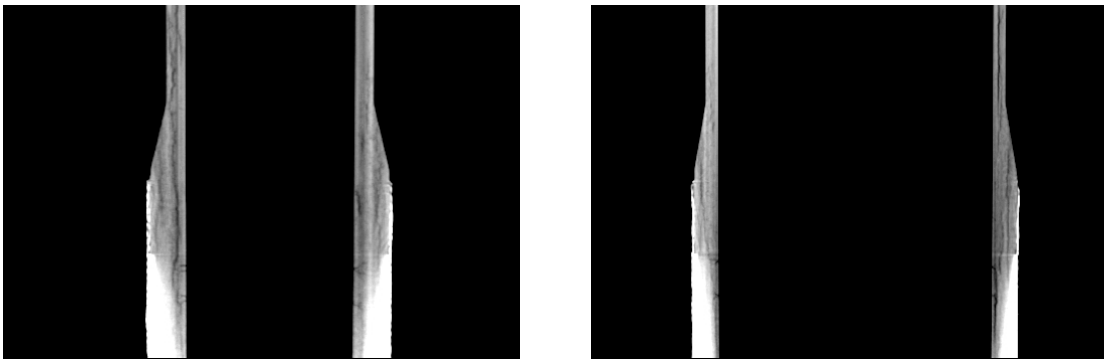

Abb. 4: Senkrechte CT Schnitte in einem GFK-Rohr nach Schwingungsprüfung mit erkennbaren Delaminationen und senkrechten Anrissen.

können, sind Objekte aus glasfaser- oder kohlenstoffaserverstärtem Kunststoff. In Abbildung 4 sind senkrechte CT-Schnitte in einem Rohr am Übergangsbereich zwischen Aluminium und GFK nach einem Dauerschwingversuch dargestellt.

Werden Quelle und Detektor nur gedreht, ist die Objektgröße hier auf 10cm beschränkt. Das Strahlenfeld kann auf den Detektor begrenzt werden, es braucht nur die Streustrahlungsintensität für den Strahlenschutz berücksichtigt zu werden. Bei einer Messung mit Objektkreiserweiterung wird im stationären Betrieb in der Regel der Detektor verschoben. Dies setzt voraus, daß der Detektor auch in der neuen Position ausgeleuchtet ist. Im mobilen Betrieb würde das dazu führen, daß ein erheblicher Direktstrahlanteil an die Umgebung abgegeben werden würde. Es sollte also entweder Detektor und Röhre verschoben und mit dem Ring zusammen gedreht, oder aber der Detektor verschoben und die Röhre, oder die Blende der Röhre im Brennfleck, gedreht werden. Bei zweifacher Messung kann der Detektor und die Röhre jeweils um den gleichen Betrag aus der Mitte verschoben werden, die überlappende Kante bildet den neuen Mittenstrahl indem der Ring jeweils um plus und minus des halben Öffnungswinkels gedreht wird. Dabei ist zu berücksichtigen, daß der Brennfleck der Röhre jetzt etwas weiter außerhalb (des Drehringes) liegt, die Entfernung Quelle-Drehpunkt sich also vergrößert hat. (Die Vergrößerung ist anders als beim ursprünglichen gemessen Kreis, in beiden Teilmessungen aber gleich.) Ist das Objekt noch größer, so daß mehrere Positionen gemessen werden müssen, so ist entweder eine zusätzliche, radiale Verfahrachse für die Quelle notwendig, oder der Verfahrweg muß als gebogene Bahn ausgelegt sein.

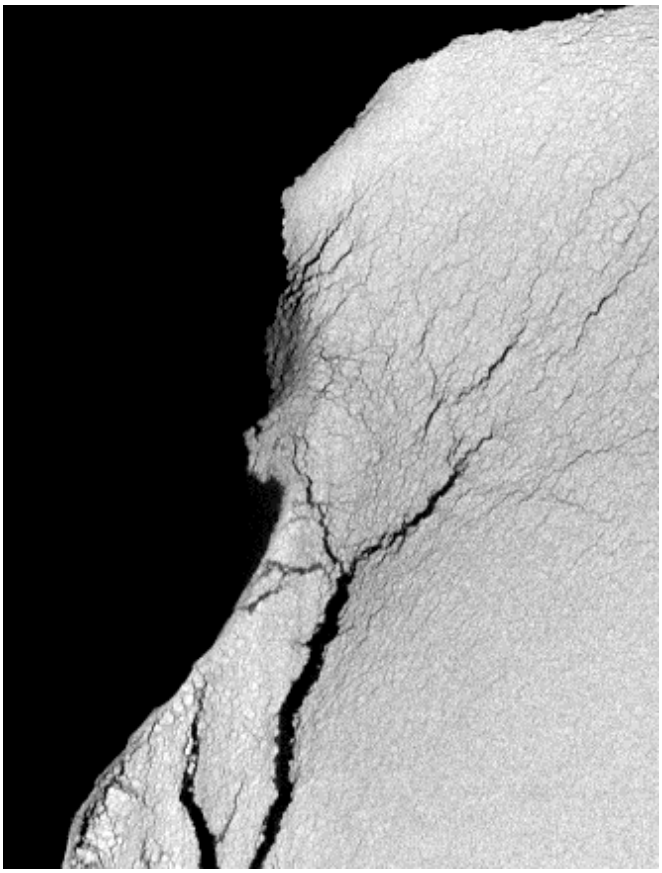

Abb. 5: Zum Vergleich zu Abb.4 die notwendige Ortsauflösung gemessen mit einer ortsfesten µCT-Anlage mit einer Voxelgröße von 50µm, Ausschnitt.

Für den hier gezeigten kleinen Marmorkopf, oder ähnliche Objekte, ist die Auflösung einer Anlage mit einem 512er Detektor vollständig ausreichend, der mit CT nachgewiesene innere Riß ist so gravierend, daß das Objekt als höchst bruchgefährdet eingestuft werden müßte. Aufgrund der charakteristischen Verzahnung des Marmors und der Aufspaltung in Teilrisse ist dieser Schaden von außen nicht feststellbar. Dies ist allerdings das Endstadium. Will man solche Prozesse, wie sie z. B. auch durch wiederholte geringe thermische Belastungen erzeugt werden im Anfangsstadium erkennen, so muß die Ortsauflösung wesentlich verbessert werden. Abb. 5 zeigt dazu eine CT-Untersuchung mit einer µCT-Laboranlage (denselben Kopf wie oben). Bei einer Voxelgröße von 50µm sind die im Marmor ablaufenden Strukturveränderungen zu erkennen. Im Außenbereich entstehen einzelne Kugelbereiche mit erhöhter Dichte. Dahinter liegt der Bereich innerer großer Risse. Danach folgt ein großer Bereich in dem sich die einzelnen Kristallite des Marmors deutlich getrennt haben: Einzelkörner von ca. 100µm Größe sind allseits getrennt. Trotzdem ist für diesen Bereich noch eine Restfestigkeit gegeben, die die Aufstellung einer solchen Statue im Innenbereich rechtfertigen würde. Eine Beurteilung durch Ultraschalluntersuchungen ist in diesem Bereich nur sehr schwer möglich.

Für eine mobile Anlage ist das Erreichen einer solchen, notwendigen Ortsauflösung alleine aufgrund der mechanischen Bedingungen (und der Bewegung der Anlage im Raum) nicht möglich.

Verbesserung durch nachträgliche Justierung

Zur Simulation einer hochgenauen CT-Messung bei der sich das Objekt während der Messung sprunghaft bewegen kann, haben wir eine 200kV Röhre mit Transmissionstarget und ein Testobjekt mit 3mm Durchmesser verwendet. Letztere steht auf einer dünnen, 50cm hohen Unterlage, so daß alle Abweichungen des Drehtisches von der Normallage verstärkt wiedergegeben werden (Abb. 6). Das Testobjekt ist ein Probenbehälter mit 3mm Durchmesser und 0,1mm Wandstärke. Abbildung 7 zeigt das leere Töpfchen rekonstruiert wie gemessen.

Insgesamt sind sechs Freiheitsgerade im Schattenbild zu korrigieren: Kippung links-rechts, Kippung aus der Bildebene, Links-rechts-Versatz, Änderung der Vergrößerung insgesamt, unregelmäßiger Drehwinkel und Höhenversatz.

Abb. 6: Versuchsaufbau zur Simulation eines beweglichen CT-Systems mit 200kV Transmissions-

Die ersten vier können wie folgt korrigiert werden: In jedem Schattenbild wird in einer oberen und einer unteren Zeile der Wert ermittelt, bei dem der Behälter von außen eine Schwächung von 10% des freien Strahles erreicht. Diese Werte werden in eine Tabelle eingetragen. Abbildung 8 zeigt die errechnete Seitwärtsbewegungen, Abbildung 9 die Änderung der Vergrößerungen.

Eine daraus erzeugte Tabelle kann direkt als Parameterliste im Feldkamp Rekonstruktionsprogramm verwendet werden. (Die entsprechende Größe wie z. B. UNITX wird mit einem Faktor aus einem Feld multipliziert.) Dadurch ist keine Interpolation der Rohdaten notwendig und die gemessene und die rekonstruierte Ortsauflösung bleiben gleich. Werden erst die Schattenbilder korrigiert, ergibt sich eine Verringerung der Ortsauflösung um den Faktor zwei. Abbildung 10 zeigt die

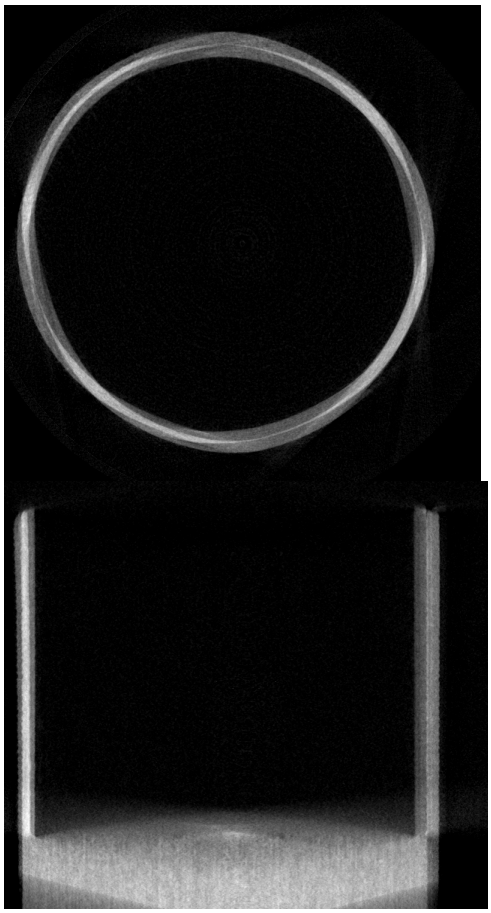

Abb. 7: Rekonstruktion eines Aluminiumtöpfchens mit 3mm Durchmesser und 021mm Wand-

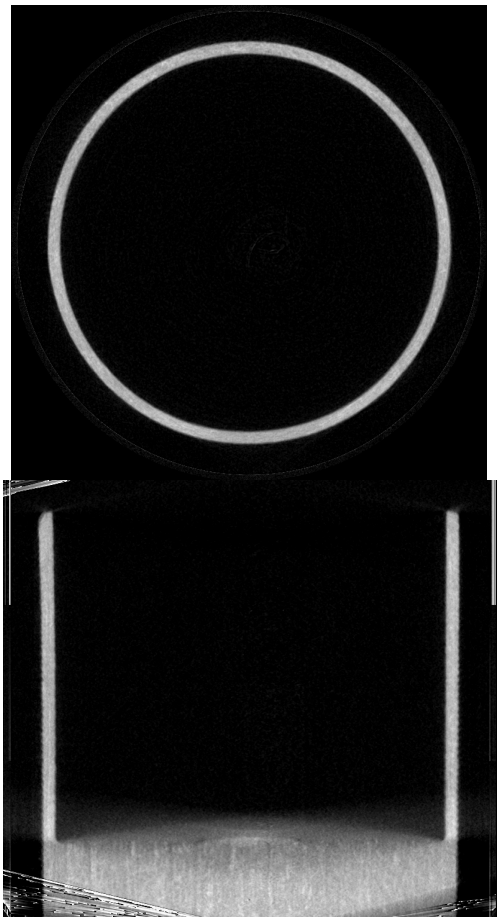

Abb. 10: Rekonstruktion eines Aluminiumtöpfchens mit 3mm Durchmesser und 021mm Wandstärke nach Korrektur, siehe Text.

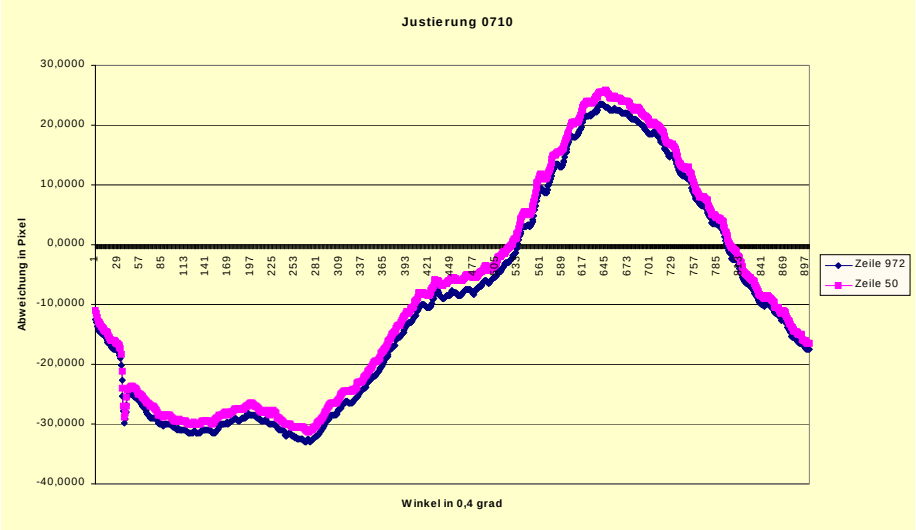

Abb. 8: Seitswärtsbewegung der Außenwand je in einer Bildzeile oben und unten

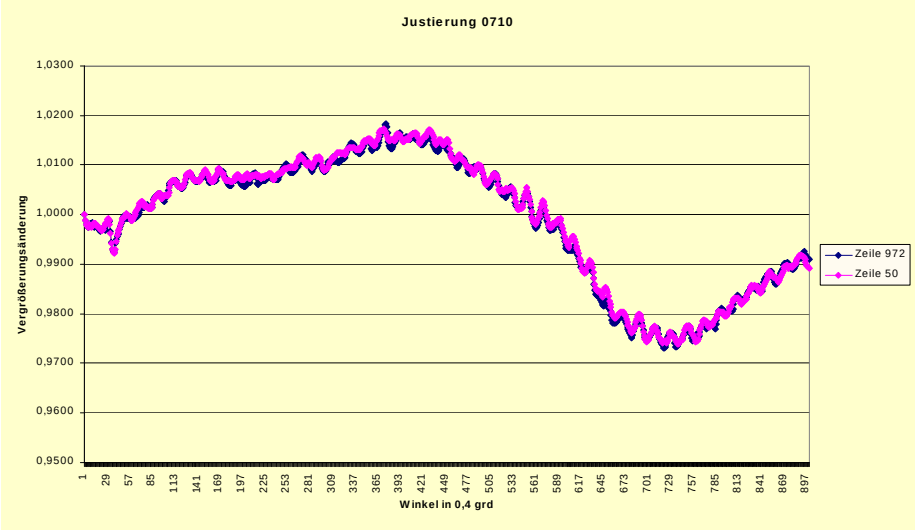

Abb. 9: Vergrößerungsänderung gemessen an der Außenwand je in einer Bildzeile oben und unten

Rekonstruktion des Töpfchens mit Korrektur. Das Töpfchen sollte aus solch einem Material gewählt werden, daß es bei der Durchstrahlung der eigentlichen Probe nicht ins Gewicht fällt. Abbildung 11 gibt die Korrekturrekonstruktion für eine Probe aus Gußeisen in dem Justiertopf wieder. Die lamellenartige Struktur der Kohlenstoffanreicherungen (dunkle Bereiche) wird ohne Artefakte aufgrund einer Bewegung der Probe wiedergegeben.

Dieses Verfahren in der mobilen Tomographie angewendet, würde zwei Halbschalen aus gering schwächendem Material vorsehen, die um die zu messende Probe gelegt werden. Da bei der mobilen CT die Vergrößerung nicht verändert werden kann, ist auch der Meßbereich durch die Detektorgröße definiert. Dadurch sind die gleichen Halbschalen für alle Messungen mit demselben Detektor zu verwenden. Werden diese am unteren und oberen Ende mit einem verstärkten Ring versehen, der Gradmarkierungen enthält, so können auch die beiden noch fehlenden Parameter für die Justierung bestimmt werden.

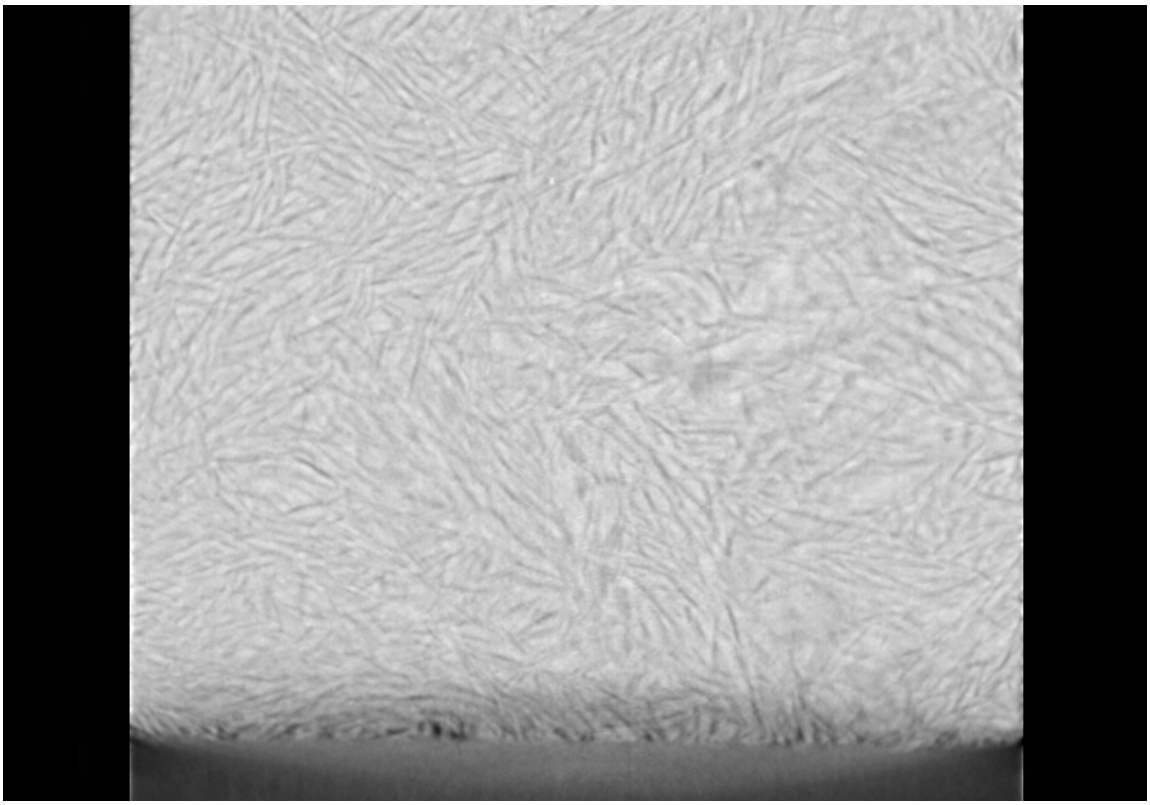

Abb. 11: Senkrechter CT-Schnitt durch eine Gußeisenprobe mit verteilten Kohlenstoffeinlagerungen in obigem Töpfchen

Referenzen

[1] A. Habermehl, H.W. Ridder, O. Weimann, Einsatz der CT bei Baumuntersuchungen, DGZfP Berichtsband 22, S. 29-42 (1991)

[2] A. Badde, B. Illerhaus, 3D-µCT IN THE ANALYSIS OF SCULPTURE, Scanning Vol. 30, 1 (2008), ISSN 0161-0457, pp16-26.