

Hochenergie radiographie - Erkennung von Einzelheiten in großen, komplexen Schichttiefen

Sanjeevareddy KOLKOORI, Norma WROBEL, Kurt OSTERLOH, Bernhard REDMER,
Andreas DERESCH, Uwe EWERT
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, 12205 Berlin
(sanjeevareddy.kolkoori@bam.de)

Kurzfassung. Zur Durchstrahlung großer, dichter Objekte reichen die Energien, die mit normalen Röntgenröhren erzielt werden können, ab gewissen Schichtdicken nicht mehr aus. Als hochenergetische Strahlenquellen stehen Kobalt-60 und Elektronenbeschleuniger zur Verfügung. Als Einschränkung der Hochenergie radiographie ist der geringere Kontrast besonders beim Vorhandensein leichterer Objekte umgeben von Körpern bestehend aus schweren Elementen anzusehen. Es ist daher zu erwarten, dass Objekte aus organischen Substanzen hinter dicken Schwermetallwänden oder in Bohrungen von Metallblöcken schwer zu erkennen sind. Im Gegensatz zu einem Gammastrahler wie Kobalt-60 mit den beiden Spektrallinien um 1,3 MeV besitzt die Bremsstrahlung aus einem Beschleuniger einen wesentlichen Anteil an niederenergetischer Strahlung, der fließend zu höheren Energien übergeht. Es wird hier untersucht, welche Signaturen von leichten Materialien in einer Umgebung aus Schwermetall bis zu welcher Dicke und bis zu welchem Komplexitätsgrad erkennbar sind. Mit einem Betatron (JME X-ray Betatron 7,5 MeV) und einem Matrixdetektor (Perkin Elmer XRD 1621) wurden Aufnahmen von unterschiedlichen leichten Objekten angefertigt, die zunehmend in eine Umgebung aus Schwermetallen gestellt wurden. Mit unterschiedlichen Energieeinstellungen wurde untersucht, inwieweit eine Materialerkennung hinter welcher Abschirmung möglich ist. Die experimentellen Ergebnisse werden mit Simulationen verglichen, die mit einer Software zur Modellierung von Durchstrahlungsverfahren (aRTist) erzeugt wurden. Dabei wird dem Problem der Aufhärtung bei Anwendung von Bremsstrahlung Rechnung getragen. Die Ergebnisse können sowohl zur Erkennung von Fremdkörpern in Maschinen oder Pumpen als auch zur Überprüfung von Frachtladungen im Bereich der öffentlichen Sicherheit und bei Zollkontrollen dienen.

1. Einführung

Im Vergleich zur gebräuchlichen niedrig-energie Röntgentechnik ($<1\text{MeV}$), ist die digitale Hochenergie radiographie ($>1\text{MeV}$) geeignet für die zerstörungsfreie Untersuchung von großen (Stahl-) Containern. Die hohe Durchdringung von dicken Materialien liefert hier eine ausreichende Empfindlichkeit sowie die Möglichkeit zur Diskriminierung von Materialien mit niedriger und hoher effektiven Kernladungszahl Z_{eff} . In der industriellen zerstörungsfreien Prüfung sind Hochenergie-Strahlungsquellen wie Linearbeschleuniger (LINAC) [1-3] und portable Betatrons [4,5] vorhanden, mit denen Materialien aus Stahl bis



zu einer Dicke von 250 mm untersucht werden können. Die Herausforderung bei der Untersuchung von Luftfracht und See-Containern liegt in der Verbesserung der Erkennbarkeit von in einem heterogen gepackten Container versteckten Schmuggelgut und gefährlichen Materialien durch die quantitative Analyse unübersichtlicher, ungeordneter radiographischer Bilder. Desweiteren ist an Seehäfen eine geringe Inspektionszeit (<1 min) und radiographische Bilder von hoher Qualität und hoher Auflösung erforderlich. Im Vergleich zum Röntgen mit niedriger Energie (<1MeV) ist der Schwächungskoeffizient bei hoher Energie (>1MeV) weniger abhängig von der Ordnungszahl, was zu Schwierigkeiten in der Materialdiskriminierung führt [6]. Hochenergie-Gammastrahler wie ^{60}Co mit zwei Spektrallinien um 1.3 MeV hat den Vorteil, dass ein guter Kontrast zwischen Materialien mit niedriger und hoher effektiven Kernladungszahl Z_{eff} erzielt werden kann. Verglichen mit Hochenergie-Röntgenquellen ist die Bildgebung nach dem Dual Energy Verfahren mit Gammastrahlern nicht möglich, ebenfalls machen die aufwendigen Strahlenschutzmaßnahmen den Einsatz von Gammastrahlern für die Container-Inspektion unattraktiv.

In der vorliegenden Arbeit werden die experimentellen Ergebnisse der Untersuchung von Stahl-Containern mit Hochenergie-Röntgentechnik, hier Betatron, und Flachdetektoren präsentiert. Die Erkennbarkeit von leichten Objekten ($Z_{\text{eff}} < 15$) in der Anwesenheit von Schwermetallen ($Z_{\text{eff}} > 25$), wie Stahlplatten, Maschinenbauteile aus Stahl mit Lochbohrungen (Dicke>85 mm), heterogene Cr-Ni-Legierungen sowie Stahlrohre mit Schweißnähten wurde hier untersucht. Zur Optimierung der Dual Energy Technik wurde ebenfalls der Einfluss eines Cu-Vorfilters am Betatron untersucht, um hier den ganzen Intensitätsbereich der Röntgenstrahlung des Betatron optimal zu nutzen. Abschließend wurde ein quantitativer Vergleich der gemessenen radiographischen Bilder mit Bilder aus der Simulation mit dem Program arTist durchgeführt.

2. Digitale Hochenergierradiographie mit Betatrons

2.1 Untersuchte Testkörper

Als Testkörper für die Untersuchungen mit digitaler Hochenergierradiographie wurde ein Miniatur Stahl-Container (Abmaße 60x30x40 cm³) gebaut. Abbildung 1 zeigt ein Bild des Container-Modells und die Anordnung des Inhaltes mit den verschiedensten Materialien (niedrige und hohe Z_{eff} -Materialien). Die Wanddicke des Container-Modells beträgt, wie bei See-Containern, 3 mm. Innerhalb des Containers befinden sich drei Regalböden, die mit Flaschen bestückt wurden, die eine Vielzahl von Materialien mit geringen effektiven Kernladungszahlen enthalten.

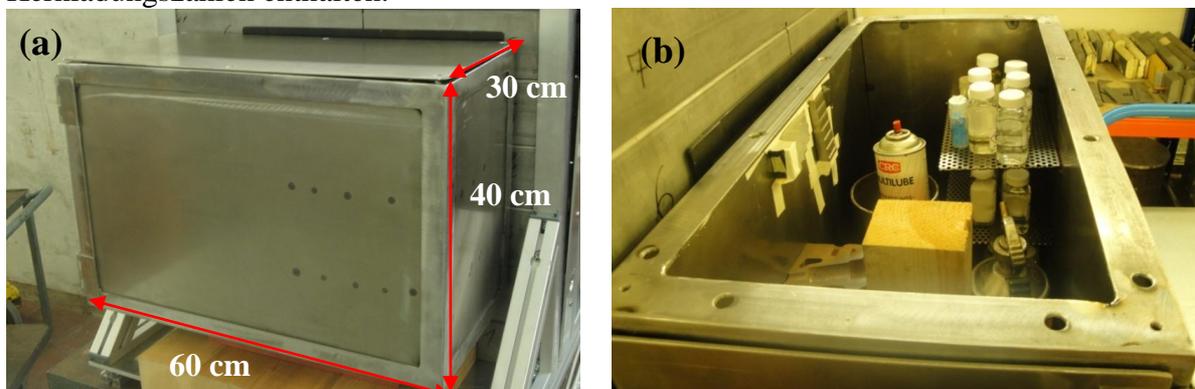


Abbildung 1. (a) Miniatur-Stahlcontainer mit Abmaßen; (b) komplexe Anordnung innerhalb des Containers mit verschiedenen Materialien.

Somit besteht die Möglichkeit mit dem präparierten Stahl-Container verschiedene Inspektionsszenarien zu simulieren, so dass er als ein Referenzmaterial für die Cargo-Container-Prüfung an Seehäfen oder in der Luftfahrt in Betracht gezogen werden kann.

2.2 Experimenteller Aufbau und Datenerfassung

Der experimentelle Aufbau für die Untersuchung des Container-Modells mit Hochenergierradiographie ist in Abbildung 2 gezeigt. Für die Generierung von Hochenergie-Röntgenstrahlung mit einem Bereich von 2-7.5 MeV wurde ein gepulstes Betatron (JME-PXB 7.5) eingesetzt. Das Target-Material ist Tantal (0.6 mm dick) und die Dosis betrug um 6.4 R/min bei einem Abstand von 1m. Ein vorgesetzter Kollimator (17cmx13.5cmx15cm) wurde zur Reduzierung des Strahlungsdurchmesser und des Streustrahlung genutzt. Für die Bildgebung wurde ein hochauflösender Matrix-Detektor von Perkin Elmer (XRD 1621) eingesetzt mit einer Detektionsfläche von 40.96x40.96 cm², 2048x2048 Pixeln der Größe 200 µm. Als Bildgebungssoftware wurde XIS von Perkin Elmer benutzt. Der Testkörper wurde direkt vor dem Matrix-Detektor platziert, um sowohl eine hohe Bildschärfe zu erhalten als auch ein bestimmte Zone des Containers (ROI) zu untersuchen (s. Abb. 2).

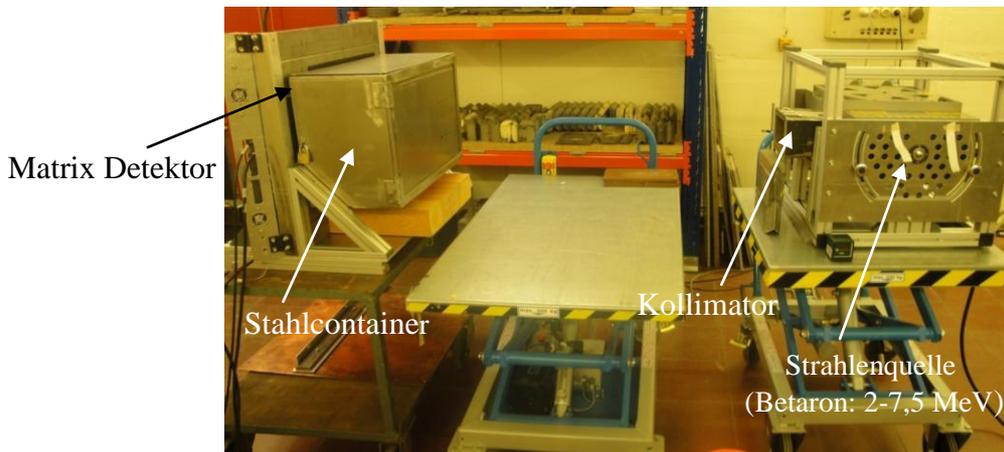


Abbildung 2. Experimenteller Aufbau.

2.3 Ergebnisse der Untersuchungen des Container-Modells

Die Abbildung 3 zeigt ein Röntgenbild des Stahl-Containers bei einer Energie von 7.5 MeV, einem 31 mm dicken Cu-Vorfilter sowie einer Belichtungszeit von 2 s. Für ein hohes SNR wurde 64 Belichtungen á 2s integriert. Um die Qualität des digitalen Röntgenbildes zu bestimmen wurde ein Stufenkeil aus Aluminium Al mit 4, 8, 12, 16, 20 mm Stufen und ein Stufenkeil aus Eisen Fe mit 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 mm Stufen an der Innenwand des Containers mit eingebracht. Die Kalibrierung des Detektors erfolgte durch die Aufnahme von zwei „Gain“-Bildern (ohne Objekt) bei konstanter Energie von 7.5 MeV, die Dicke des Cu-Vorfilters wurde variiert (10 bzw. 31 mm). Die Bilder wurden mit der eigenen Bildbearbeitungssoftware ISee! [7] bezüglich der Verbesserung der Bildqualität bearbeitet. Die Materialdichten innerhalb des Container-Modells lagen in einem Bereich von 0.78 g/cm³ und 11.34 g/cm³. Der Abstand zwischen der Strahlungsquelle und dem Matrix-Detektor betrug 178 cm und zwischen Container und Detektor 36 cm. Die mit verschiedenen Gefahrstoffen gefüllten Glasflaschen sind in der Abb. 3 klar erkennbar. In einem ersten Experiment wurde ein 86 mm dickes Maschinenbauteil mit Flachbohrungen in der linken Ecke des Containers platziert (s. Abb. 3).

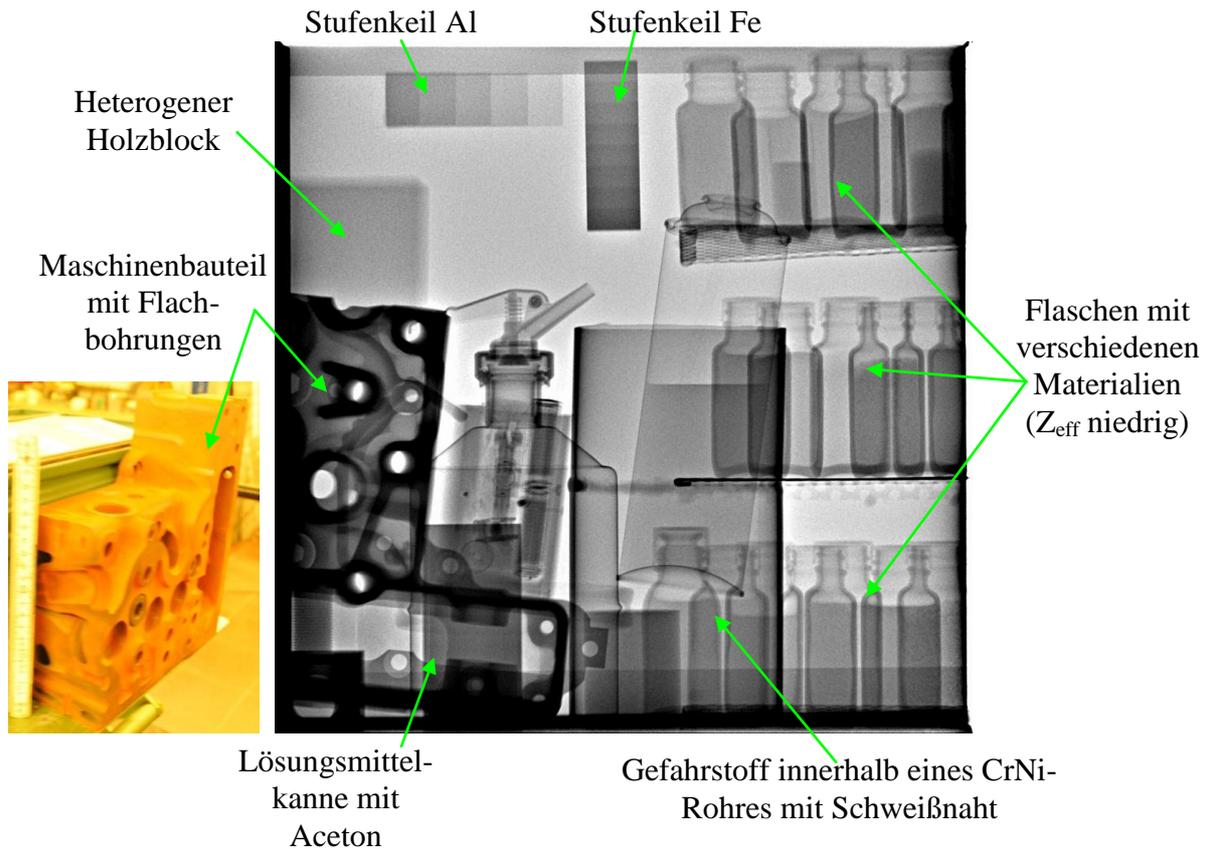


Abbildung 3. Durchstrahlungsbild des Miniatur Stahlcontainers mit versteckten Gefahrstoffen, 7.5 MeV, 2 s Belichtungszeit.

Die komplexe Struktur des Bauteils ist durch die Nutzung der hohen Energie gut zu identifizieren. Versteckte Materialien innerhalb des Cr-Ni-Rohres (10 cm Durchmesser, 15 mm Dicke, 21 cm hoch) mit Schweißnaht sind ebenfalls klar zu erkennen. Für die Bestimmung der Bildqualität sind alle Stufen der verwandten Stufenkeile im Bild deutlich identifizierbar und wurden benutzt um den Hochenergie-Schwächungskoeffizienten (μ) zu berechnen. Der Vergleich zwischen den gemessenen und simulierten Schwächungskoeffizienten wird in Abschnitt 3 diskutiert.

Für eine weitere experimentelle Untersuchung wurde die Heterogenität im Bereich der eingestellten Flaschen durch weiteres Einbringen von Material in den Container erhöht. Das Röntgenbild zeigt Abbildung 4. Durch die Anwesenheit des Maschinenbauteils mit Flachbohrungen in der rechten Ecke des Containers erhält man ein unübersichtliches Durchstrahlungsbild in dem es schwierig ist, organische (Z_{eff} niedrig) und anorganische (Z_{eff} hoch) Materialien voneinander zu unterscheiden. Im Vergleich zum Bild aus Abbildung 3 sind hier die mit Gefahrstoffen gefüllten Glasflaschen aufgrund der starken Abschirmung durch den Metallblock schwer zu detektieren bzw. zu erkennen. Im Vordergrund des Metallblocks ist in Abb. 4 deutlich eine USBV-Attrappe zu erkennen, die hinter einer Spraydose platziert wurde.

Wie erwartet, sind beide Durchstrahlungsbilder (s. Abb.3 und 4) etwas heller. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Wechselwirkung Strahlung-Material für die Hochenergie-Röntgenstrahlung ($> 1\text{MeV}$) durch die Paarbildung und die Compton-Streuung dominiert, was zu einer geringen Abhängigkeit der Röntgenattenuation von der Ordnungszahl des Materials führt.

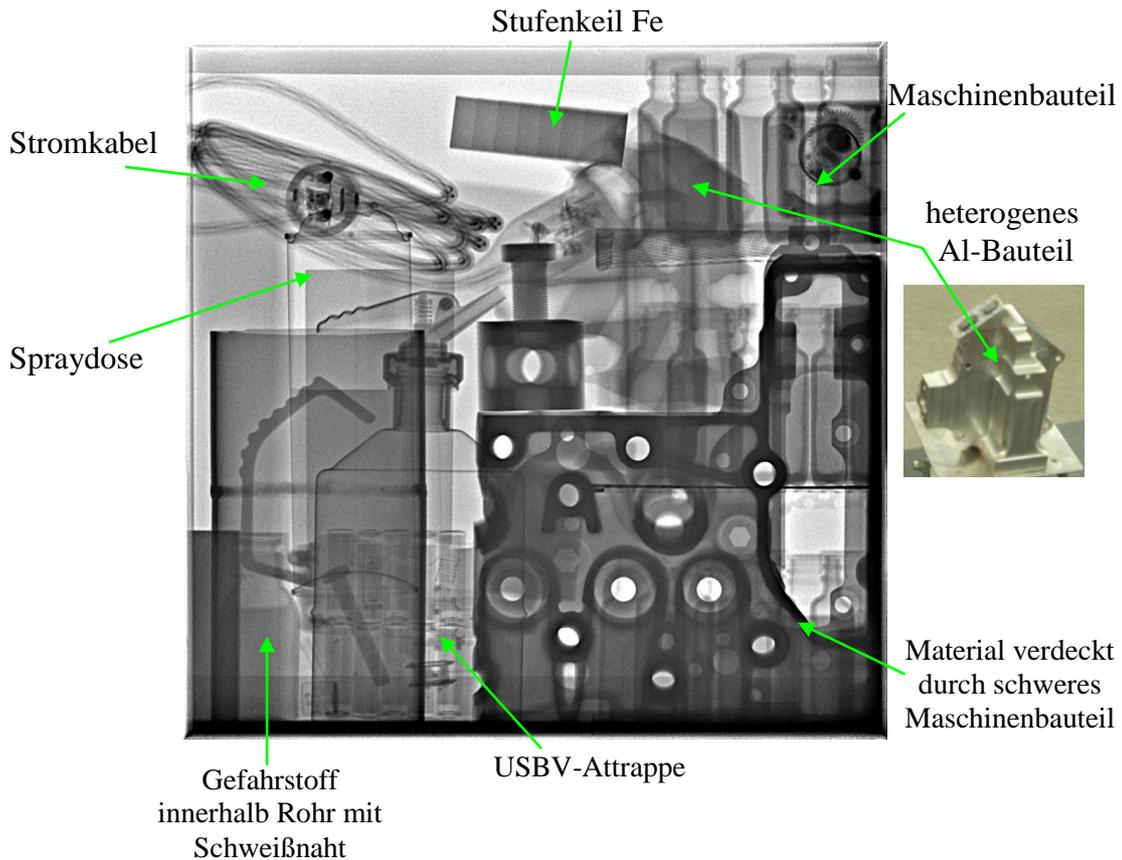


Abbildung 4. Durchstrahlungsbild des Miniatur Stahlcontainers mit versteckten Gefahrstoffen, 2.5 MeV, 2 s Belichtungszeit. Abstand: Strahlungsquelle-Detektor 178 cm, Strahlungsquelle-Objekt 143 cm.

Alle experimentellen Untersuchungen wurden mit verschiedenen Röntgenenergien, Dicken des Cu-Vorfilters und Belichtungszeiten durchgeführt, um die Veränderung des Hochenergie-Schwächungskoeffizienten (μ) bei unterschiedlichen Materialien sowie den Einfluss von Streustrahlung im digitalen Röntgenbild zu verstehen. Für die weitere Evaluierung zur Materialdiskriminierung in Cargo-Containern werden diese ersten Ergebnisse weiter verfeinert und das Dual Energy-Verfahren für Hochenergie-Radiographie angewandt.

3. Modellierung radiographischer Untersuchungen von Cargo Containern

3.1 aRTist (analytical RT inspection Simulation Tool)

Das aRTist Programm ist ein effizientes numerisches Simulationsprogramm, um realistische radiographische Inspektionen einer großen Auswahl Komponenten z.B. aus dem Stromversorgungssektor, der Bahn oder Konstruktionen zu simulieren [8-10]. Es benutzt analytische Strahlverfolgungsalgorithmen, welche den Röntgenstrahldurchdringungsprozess dreidimensional modellieren. Das radiographische Bild wird durch die Verfolgung der Strahlen erzeugt, die im Brennfleck der Röntgenquelle für jeden Pixel des Detektors gebündelt werden. In der vorliegenden Untersuchung wurde die Anwendung der aRTist Software für eine Container-Inspektion angewandt.

In der Abbildung 5 ist der experimentelle Aufbau für den Vergleich der aRTist Simulation mit den experimentellen Daten gezeigt. Das zu untersuchende Objekt besteht aus einer 3mm dicken Stahl-Box und einem Karton („Papp-Container“), der mit Feststoffen gefüllten PE-Flaschen (Calciumlactat, Calciumsulfat, Ammoniumchlorid, Zinnchlorid) und

mit Flüssigkeiten gefüllten Glasflaschen bestückt wurde. Zusätzlich wurde das Testobjekt zwischen zwei 10 mm dicke Stahlplatten gestellt. Zur Bestimmung der Bildqualität und zur Berechnung der realistischen Hochenergie-Röntgen-Schwächungskoeffizienten wurden ebenfalls Stufenkeile aus verschiedenen Materialien (Al, Cu, Fe, und PMMA) hinzugefügt. Der Aufbau für die Modellierung mit aRTist einschließlich Kollimator und Bleiabschirmung ist in der Abbildung 6 aufgezeigt. Folgende Parameter wurden für die Strahlenquelle und den Detektor benutzt: Quelle, 6 MeV, 4 mm Cu-Vorfilter, 0.6 mm Target aus Tantal), und Detektor, Matrix-Detektor 2048x2048 Pixel mit 200 μm Pixelgröße. Für das resultierende Röntgenbild, 80 Frames á 5s Belichtungszeit.

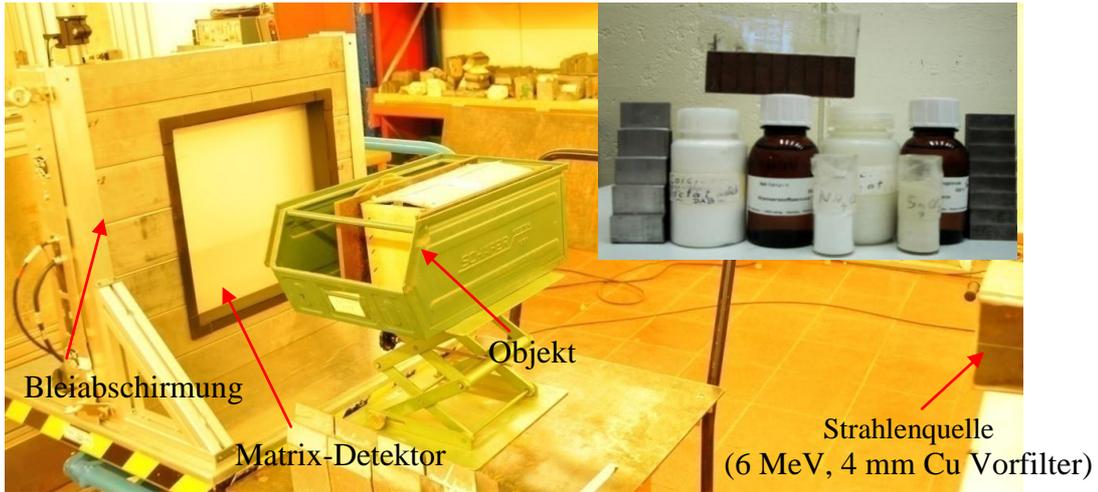


Abbildung 5. Experimenteller Aufbau für den Vergleich Simulation und Experiment. Oben rechts: Materialien innerhalb des Objektes.

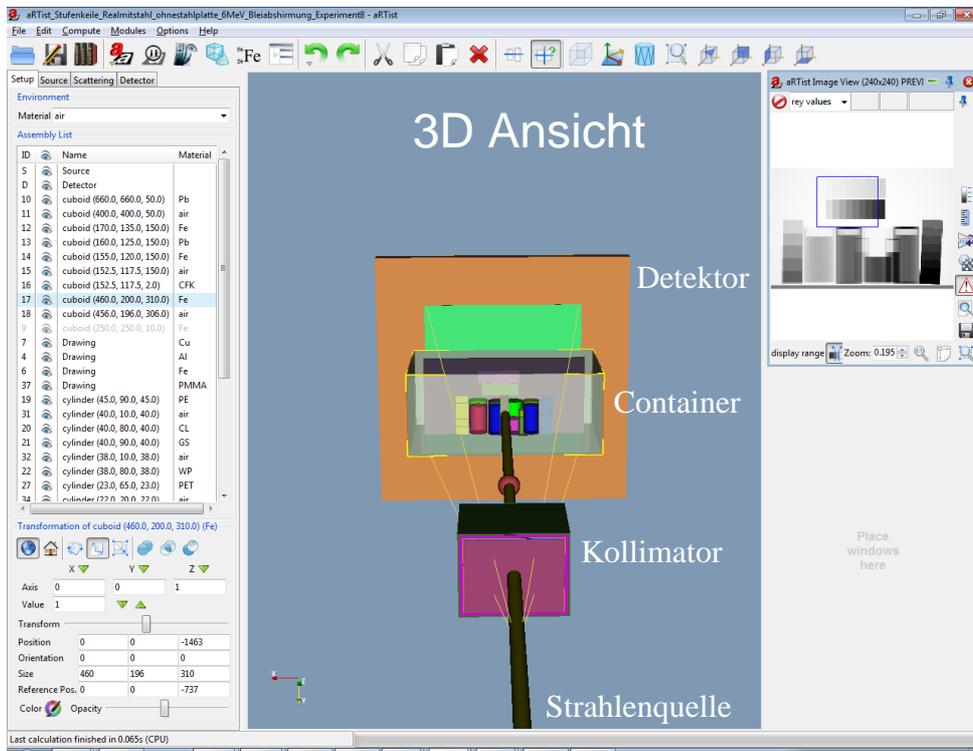


Abbildung 6. Modellierung radiographischer Untersuchungen von Cargo Containern mit aRTist Software.

3.2 Vergleich der aRTist Simulation mit den experimentellen Daten

Die Abbildung 7 zeigt den Vergleich zwischen dem simulierten Durchstrahlungsbild und dem realen experimentell erzeugten Röntgenbild. Auf den ersten Blick erkennt man eine gute Übereinstimmung. In dem modellierten Bild wurden die Streueffekte durch ein BAM-eigenes Monte-Carlo Programm mit einbezogen. Die Glas- bzw. PE-Flaschen wurden in der Simulation als Zylinder dargestellt. Das simulierte Intensitätsprofil zeigt eine gute quantitative Übereinstimmung mit den Experimenten (Abb. 7 unten). Die Tabelle 1 zeigt den Vergleich zwischen den gemessenen und simulierten Schwächungskoeffizienten für Al, Cu und Fe bei 6 MeV mit einem 4 mm dicken Cu-Vorfilter.

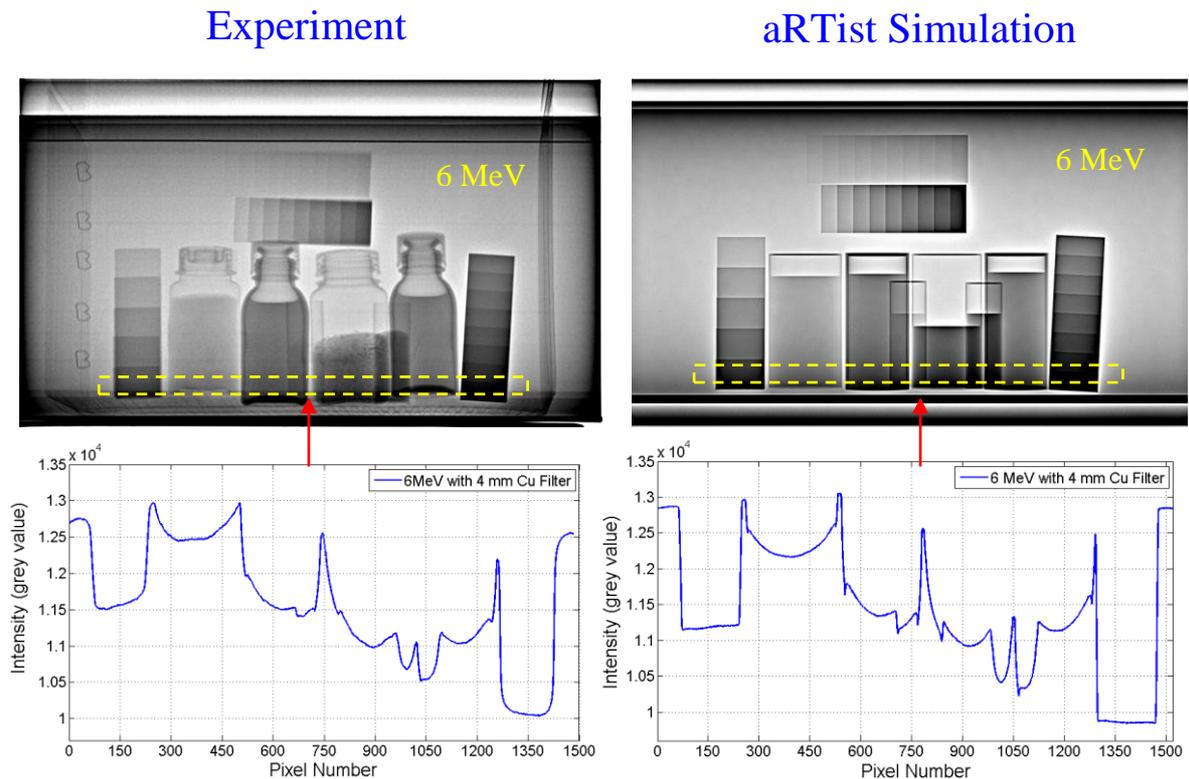


Abbildung 7. Vergleich: Experiment-aRTist Simulation. Oben: Durchstrahlungsbilder. Unten: Intensitätsprofile zum gelb markierten Bereich. Eine gute quantitative Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment wurde erzielt.

Tabelle 1. Vergleich gemessene und simulierte Schwächungskoeffizienten (μ/ρ)

Röntgenenergie: 6 MeV Material	Schwächungskoeffizient (cm^2/g)e-2	
	Experiment	aRTist Simulation
Aluminium (Z=13)	2.749	2.757
Eisen (Z=26)	2.765	2.456
Kupfer (Z =29)	2.139	2.174

4. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde die zerstörungsfreie Inspektion von Stahlcontainern mit Hochenergie- γ -Strahlung eines Betatrons (2-7.5 MeV) und hochauflösenden Flachdetektoren präsentiert. Aus den experimentellen Untersuchungen geht hervor, dass aus einer erhöhten Heterogenität des Containerinhalts ein ebenso ungeordnetes Durchstrahlungsbild resultiert. Dadurch wird die Unterscheidung von Materialien erschwert, besonders in der Anwesenheit von Schwermetallen, d.h. dicken (>85 mm) Stahlbauteilen mit Lochbohrungen und komplexen Strukturen. Ebenfalls wurde der Einfluss der Dicke des Cu-Vorfilters auf das Bremsstrahlungsspektrum untersucht, um optimale Bedingungen für die anstehende Dual-Energy-Radiographie zu ermitteln. Die Simulation einer radiographischen Untersuchung von Containern wurde mit der bereits vorgestellten aRTist Software durchgeführt. Simulierte Durchstrahlungsbilder eines Stahlcontainers mit verschiedenen enthaltenen Materialien wurden mit den experimentellen Ergebnissen quantitativ verglichen. Die gemessenen Schwächungskoeffizienten für Al, Cu und Fe zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen.

Die zukünftigen Arbeiten werden sich mit der Materialdiskriminierung in Stahlcontainern mit einem komplexen Inhalt unter Anwendung der Dualenergie-Hochenergierradiographie sowie mit der Computertomographie beschäftigen.

Danksagung

Die präsentierten Arbeiten wurden finanziell durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Sicherheitsforschungsprogramm Forschung für die Zivile Sicherheit (Projekte: ACCIS, FKZ: 13N11158 und SefLog, FKZ: 13N11225). Für hilfreiche Diskussionen gilt der Dank Dr. Carsten Bellon, Dr. Uwe Zscherpel, und Dr. Gerd-Rüdiger Jaenisch.

Referenzen

- [1] C. Tang, H.B. Chen, Y.H. Liu, Electron Linacs for Cargo Inspection and Other Industrial Applications, IAEA Proceedings of International Topical Meeting on Nuclear Research Applications and Utilization of Accelerators, 4-8 May 2009, Vienna. SM/EB-28, 1-8.
- [2] S. Ogorodnikov and V. Pstrunin, Processing of interlaced images in 4–10 MeV dual energy customs system for material recognition, Physical Review Special Topics- Accelerators and Beams, Vol. 5, pp. 104701-11, 2002.
- [3] A.V. Mishin, Advances in X-band and S-band linear accelerators for security, NDT and other applications, Proceedings of Particle Accelerator Conference, Knoxville, TN, IEEE, pp. 240-244, 2005.
- [4] M. Stein, V.A. Kasyanov, V.A. Chaklov, J. Macleod, P. Marjoribanks, S. Hubbard, Small size betatrons for radiographic inspection, Proceedings of 16th World Conference on Non Destructive Testing, Radiography, Montreal, Canada, 2004.
- [5] B. Redmer, W. Przybilla, M. Föllner, H.-J. Malitte, U. Ewert, Anwendung hochenergetischer Strahlenquellen in der Durchstrahlungsprüfung, DGZfP Jahrestagung 2011, ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung, Vortrag, 30. Mai -1. June, Bremen, 2011.

- [6] X. Wang, J. Li, K. Kang, C. Tang, L. Zhang, Z. Chen, Y. Li, H. Zhong, Material discrimination by high-energy X-ray dual-energy imaging, High Energy Physics and Nuclear Physics, Vol.31, No.11, pp. 1076-1081, 2007.
- [7] Isee!, BAM radiographic image analysis software; <http://www.dir.bam.de/ic/>
- [8] Gerd-Rüdiger Tillack, Christina Nockemann, Carsten Bellon, X-ray modelling for industrial applications, NDT & E International, Vol. 33, pp. 481–488, 2000.
- [9] Carsten Bellon, Gerd-Rüdiger Jaenisch, aRTist-Analytical RT Inspection Simulation Tool, Proceedings of International Symposium on Digital industrial Radiology and Computed Tomography, June 25-27, 2007, Lyon, France.
- [10] Andreas Deresch, Gerd-Rüdiger Jaenisch, Carsten Bellon, Alexander Warrikhoff, Simulating X- ray Spectra: From Tube Parameters to Detector Output, Proceedings of 18th World Conference on Nondestructive Testing, 16-20 April 2012, Durban, South Africa.