

# Simulationsstudie zur Hochenergie-Röntgen-Laminographie an großen Objekten

Petra-Maria KEßLING\*, Theobald FUCHS\*, Ulf HAßLER\*, Frank SUKOWSKI\*,  
Norman UHLMANN\*, Michael MAISL\*\*, Stefan SCHRÖPFER\*, Markus REHAK\*

Fraunhofer-Entwicklungszentrum Röntgentechnik EZRT

Dr.-Mack-Straße 81, 90762 Fürth

E-Mail: [petra.kessling@iis.fraunhofer.de](mailto:petra.kessling@iis.fraunhofer.de)

\* Fraunhofer EZRT, Fürth

\*\* Fraunhofer EZRT, Saarbrücken

**Kurzfassung.** Der Konferenzbeitrag zeigt erste Möglichkeiten zur laminographischen 3-D Bildgebung an sehr großen und schweren, also nur mit hohem Aufwand beweglichen Objekten auf. Ein möglicher Anwendungsbereich für das Verfahren ist die nicht-invasive Inspektion von Frachtcontainern. Hier zielt die Studie insbesondere auf die Aufklärung von Objektbereichen ab, die mit herkömmlicher 2-D-Durchstrahlungstechnik nicht ausreichend aufgeklärt werden können.

In der vorgestellten Studie wird anhand von Simulationen das zu erwartende Prüfergebnis in Abhängigkeit von Anlagengeometrie und Messablauf untersucht. Zunächst werden die alternativen Messgeometrien sowie der innere Aufbau des virtuellen Objekts für die laminographische Inspektion definiert und der Messablauf für eine Monte-Carlo-Simulation parametrisiert. Als Röntgenquelle wird ein Linearbeschleuniger mit bis zu 9 MeV Anregungsenergie angenommen. Mittels der Monte-Carlo-Simulation wird eine geringe Anzahl Röntgenprojektionen des virtuellen Prüfobjekts gemäß dem laminographischen Messablauf bei unterschiedlichen Prüfparametern berechnet und bewertet.

Die aus diesen simulierten Durchstrahlungsbildern errechneten laminographischen Rekonstruktionen werden daraufhin in Hinblick auf ihre Bildqualität verglichen.

## 1. Motivation

Während sich die Inspektion von LKWs und Containern in der Vergangenheit hauptsächlich auf die stichprobenweise Suche nach Schmuggelgütern wie Zigaretten und Drogen mithilfe von 2-D-Röntgendurchstrahlungsportalen konzentrierte, rückt in den letzten Jahren die Suche nach illegalen Containerinhalten in den Vordergrund, die zur Vorbereitung oder Durchführung terroristischer Anschläge genutzt werden können. Insbesondere das US-amerikanische H.R.1-Gesetz [1] – („Safe Port Act“) sieht vor, dass ab Mitte 2012 sämtliche Container, die zum Export in die USA vorgesehen sind, vor der Einschiffung einer Röntgeninspektion sowie einer Radioaktivitätsdetektion unterzogen werden müssen. Allein in Bremerhaven wird demzufolge mit etwa 1.500 täglich zu durchleuchtenden Boxen gerechnet.

Ein Konsortium aus Hafenbetreibern, Industrie, Behörden und Forschungsinstituten untersucht im vom BMBF geförderten Projekt ECSIT [2] unter anderem, ob und gegebenenfalls welche Inspektionstechnik sich dafür eignet.

Zur Ergänzung einer hochdurchsatzfähigen 2-D-Durchleuchtung auf der Basis vorhandener Röntgen-Bildgebungstechnik wird im Rahmen des Projektes eine weitere innovative, räumlich auflösende 3-D-Röntgenstufe zur Erkundung von Containerbereichen evaluiert, die mit der 2-D-Technik nicht aufgeklärt werden können.

Die vorliegende Studie wurde im Rahmen von ECSIT angefertigt und zeigt eine Methodik zum simulativen Vergleich unterschiedlicher in Betracht gezogener Systemkonzepte anhand eines Vergleichs dreier prinzipiell verschiedener Messgeometrien auf.

## **2. Methodik**

Ein geeignetes Röntgensystem mit ausreichender Bildqualität zur Lösung dieser Inspektionsaufgabe muss unterschiedlichen Randbedingungen genügen. Neben der Bildaufnahmezeit sind die Kosten für die Anlagenbeschaffung und der Platzbedarf der Anlage zu minimieren. Auch das Objekt stellt durch seine Größe, sein Gewicht und möglicherweise auftretende große Durchstrahlungslängen von z.B. 30 cm Stahl besondere Anforderungen. Darüber hinaus dürfen Container - anders als viele kleinere Prüfobjekte, die in der zerstörungsfreien Prüftechnik untersucht werden - nicht gekippt oder um ihre Längsachse gedreht werden.

Für die Bildgebung kommen verschiedene Röntgensysteme bestehend aus Strahlungsquelle, Detektor und Verfahrenen für unterschiedliche Abtastgeometrien infrage. Drei mögliche Geometrien sollen im Folgenden vorgestellt und hinsichtlich ihrer Ergebnisse miteinander verglichen werden. Jeder Entwurf wurde virtuell am Rechner modelliert. Als Standard-Prüfobjekt wurde ein virtueller Modellcontainer definiert. Durch Monte-Carlo-Röntgensimulationen werden die Ergebnisprojektionen für jeden Geometrieentwurf virtuell erzeugt und anschließend mit zum Teil mehreren Rekonstruktionsverfahren zu einem 3-D-Schichtbild rekonstruiert. Die Ergebnisse werden miteinander verglichen.

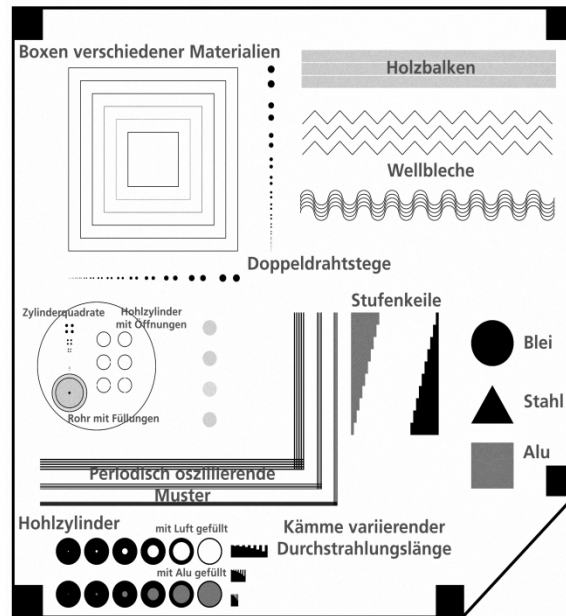
## **3. Monte-Carlo-Simulationen**

### *3.1 Simulation eines virtuellen Containermodells*

Reale Container können jeden beliebigen transportablen Inhalt, beispielsweise Mehlsäcke, Maschinenteile oder auch Umzugsgut enthalten. Deshalb sind repräsentative Ladungen schwer nachzubilden. In dieser Studie wird für die vergleichenden Untersuchungen stattdessen ein Standard-Prüfobjekt in der Form einer verkleinerten Containerschicht mit gleichbleibendem Querschnitt ( $H \times B \times L = 1000 \times 1000 \times 100 \text{ mm}^3$ ) zeichnerisch entworfen, das sogenannte virtuelle Containermodell. Das Modell wird mit Testkörperformen aus unterschiedlichen typischen Materialien befüllt und am Rechner formal erfasst (Figur 1). Dieses Modell dient später als Eingabegröße für die Monte-Carlo-Simulation der Röntgendurchstrahlungen.

Die Containerumrisse wurden durch Stahlträger und 2 mm dicke Stahlwände modelliert. Die abgeschrägte Ecke ist einem Luftfrachtcontainer nachempfunden. Im Containerinneren befinden sich linksseitig Boxen aus verschiedenen Materialien. Rechts davon und darunter stecken Doppeldraht-Elemente mit abnehmenden Dicken/Abständen (12 mm, 10 mm, 8 mm, 6 mm, 5 mm, 4 mm usw.) zur späteren Beurteilung der Bildgüte. Etwas tiefer liegt ein ölgefülltes Stahlfass mit eingebrachten unterbrochenen Zylindern und anderen Elementen. Unter rechtwinklig geknickten Blechstapeln befinden sich zwei Reihen dickwandige Stahlzylinder mit Luft- bzw. Aluminiumfüllung. Rechtsseitig ist der Container

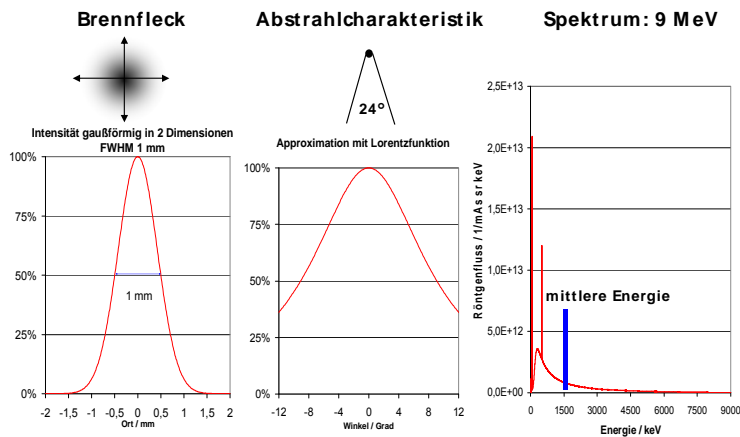
mit Holzbalken, spitz und rund geformten Wellblechen sowie Stufenkeilen und geometrisch geformten Testkörpern aus Blei, Stahl und Aluminium gefüllt.



Figur 1. Virtueller Modellcontainer

### 3.2 Simulation einer Hochenergie-Strahlenquelle

Nach der Festlegung eines Standard-Testobjekts werden nun die Komponenten der zu simulierenden Röntgenanlage definiert und im Simulationsprogramm erfasst.



Figur 2. Simulierte Strahlcharakteristik des Linearbeschleunigers

Weil bei der Aufnahme der Röntgenprojektionen eines Containers mit großen Durchstrahlungslängen von z.B. mehrere 10 cm Stahl zu rechnen ist, kommt als Strahlungsquelle nur eine Hochenergie-Strahlenquelle infrage. Eine herkömmliche Röntgenröhre mit maximal 600 kV Röhrenspannung könnte die geforderte Stahldurchdringungsfähigkeit nicht aufbringen. Da auch die in Standard-2-D-Scan-Anlagen verwendeten Betatrone mit Strahlungsenergien bis 3 MeV zur Durchstrahlung stark absorbierender Containerbereiche nicht immer ausreichen, wird für diese Studie ein Linearbeschleuniger mit bis zu 9 MeV Strahlungsenergie simuliert. Wie in Figur 2 dargestellt verfügt sein Wolframtarget über einen Brennfleck von 1 mm Durchmesser und

einen nutzbaren Öffnungswinkel von 24 Grad. Dieser geringe Öffnungswinkel ist für Linearbeschleuniger mit ihrer nach vorne ausgerichteten Strahlung typisch. Das simulierte abgestrahlte Röntgenspektrum weist zusätzlich zum typischen Bremsstrahlungsverlauf eine charakteristische Wolframlinie und den aus der Positronen-Annihilation resultierenden 511 keV-Peak auf. Der Röntgenstrahl wird zu einem Fächer von 1 mm Breite in 10 m Entfernung kollimiert.

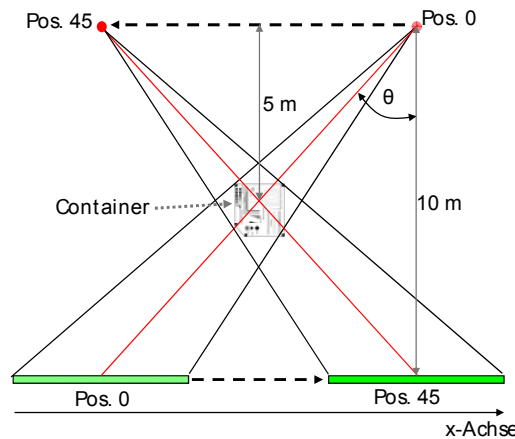
### 3.3 Simulation eines hochenergietauglichen Zeilendetektors

Zur Bildaufnahme wird in dieser Studie ein für hohe Energien geeigneter Zeilendetektor mit  $\text{CdWO}_4$ -Szintillator angenommen. Die Länge der Detektorzeile wird auf 4.096 mm festgelegt damit das Abbild des Containermodells bei den verwendeten Abtastgeometrien komplett auf den Detektor passt. Die Zeile verfügt über 1024 Pixel mit einem Pixel-zu-Pixel-Abstand von 4 mm und einer Höhe der Pixel (senkrecht zu der Schnittebene) von 10 mm. Die einzelnen Pixel sind durch  $150 \mu\text{m}$  dicke Bleisepta voneinander getrennt.

### 3.4 Drei alternative Aufnahmegeometrien

Nach der Definition der Röntgenkomponenten werden nun beispielhaft drei denkbare Aufnahmegeometrien vorgestellt, deren Bildgebungsergebnisse nachfolgend miteinander verglichen werden sollen. Alle drei Geometrien sind für die Aufnahme von jeweils 46 Projektionen aus verschiedenen Perspektiven konzipiert. Der Abstand zwischen der Fokus- und der Detektorebene beträgt jeweils 10 m, das Prüfobjekt befindet sich in der Mitte. Diese großen Abmessungen ergeben sich aus dem eingeschränkten nutzbaren Öffnungswinkel der Strahlenquelle und der hier gewünschten zweifachen Vergrößerung.

Die erste untersuchte Aufnahmegeometrie entspricht einer gegenläufigen Translationslaminographie über den Containerquerschnitt. Quelle und Detektor bewegen sich auf parallelen, geraden Linien in entgegengesetzter Richtung am Objekt vorbei. Figur 3 zeigt neben dieser Anordnung die mathematische Beschreibung der Komponentenpositionen auf.

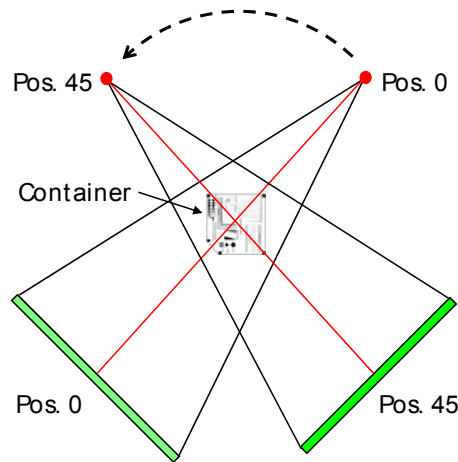


**Figur 3.** Aufnahmegeometrie "Gegenläufige Translationslaminographie". Der Abstand der Fokus zur Detektorebene beträgt 10 m, der Abstand des Fokus zur Objektebene 5 m. Der Winkel des Zentralstrahls berechnet sich zu  $\theta(N) = (45 - 2N)^\circ$ , die x-Position der Quelle zu  $x_Q(N) = 500 \text{ cm} \cdot \tan \theta(N)$  und die x-Position der Detektormitte zu  $x_D(N) = -x_Q(N)$ .

Man beachte die Hauptdurchstrahlungsrichtung durch den virtuellen Container, die von der Rückwand entlang der Rohrreihen zur vorderen, abgeschrägten Containerwand

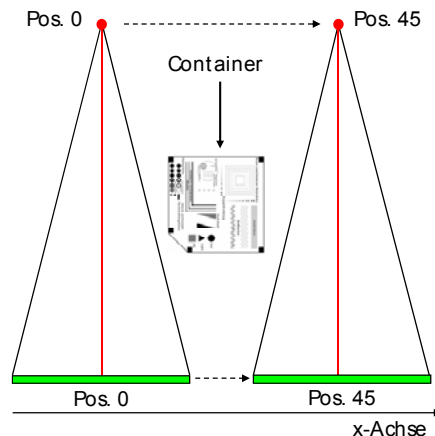
verläuft. Diese Hauptdurchstrahlungsrichtung wird in analoger Weise auch für die beiden nachfolgenden Aufnahmegeometrien gewählt.

Die nächste betrachtete Aufnahmegeometrie entspricht einer Computertomographie (CT) mit auf 90 Grad eingeschränktem Winkelbereich (Figur 4). Diese Anordnung wird als Limited-Angle-CT bezeichnet. Quelle und Detektor bewegen sich auf Kreisbahnabschnitten in zwei-Grad-Schritten um die Containerscheibe.



**Figur 4.** Aufnahmegeometrie "Limited Angle-CT". Fokus-Objekt- sowie Fokus-Detektorabstand sind identisch zur Aufnahmegeometrie "Gegenläufige Translationslaminographie". Im Abstand von 2 Grad werden 46 Projektionen zwischen 0 und 90 Grad Projektionswinkel aufgenommen.

Bei der dritten untersuchten Aufnahmegeometrie (Figur 5) handelt es sich um eine Parallelverschiebung von Quelle und Detektor über das virtuelle Prüfobjekt hinweg. Die unterschiedlichen Perspektiven ergeben sich in diesem Falle aus dem Öffnungswinkel der Quelle.



**Figur 5.** Aufnahmegeometrie "Parallelverschiebung". Die Abstände entsprechen denen der beiden vorhergehenden Anordnungen (Fig. 3 und 4). Die 46 x-Positionen der Quelle liegen zwischen -157,5 cm und +157,5 cm im Abstand von 7 cm.

### 3.5 Röntgensimulationen zur Erzeugung von Projektionen

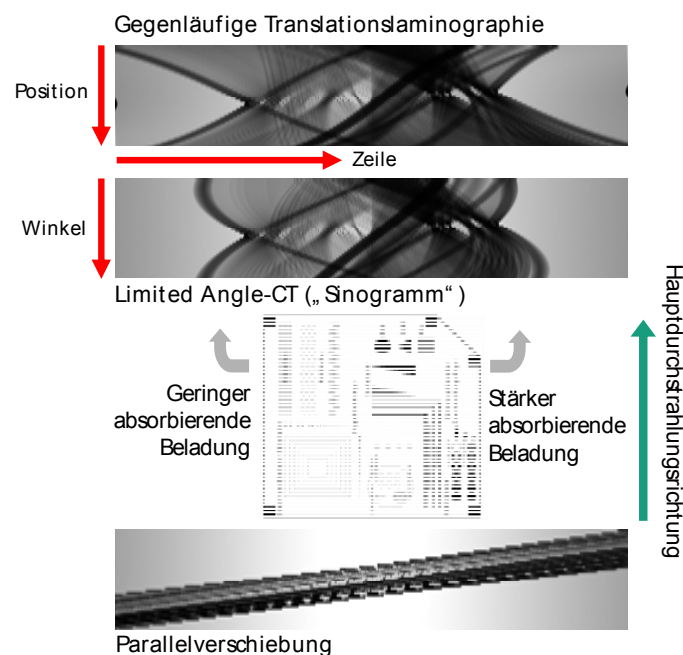
Nach der Definition der zu untersuchenden Röntgensystem-Anordnungen und des virtuellen Prüfobjekts können im nächsten Schritt nun die jeweils 46 Röntgenprojektionen des Containerquerschnitts erzeugt werden. Weil es sich nicht um eine reale Anlage handelt, werden die Projektionen simuliert. Dies geschieht mithilfe der Röntgen-Simulationssoftware ROSI [3]. ROSI bildet gemäß der Monte-Carlo-Simulationsmethodik

den Verlauf einzelner Photonen beginnend mit ihrer Emission aus dem Target des Linearbeschleunigers bis hin zum Auftreffen und der Umwandlung auf dem Detektor oder ihrem Verschwinden durch Absorption nach. Dabei werden die Wechselwirkung mit der Materie des Prüfobjekts gemäß den Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Auftretens der verschiedenen physikalischen Effekte einbezogen, z.B. Absorption, Compton-Streuung sowie 511 keV-Photonen, die im Hochenergie-Röntgenbereich bei der Annihilation der aus der Paarbildung hervorgehenden Positronen entstehen. Auch die Wechselwirkungen mit dem Detektormaterial werden im Detail berechnet. Bei der Simulation können einzelne physikalische Effekte wahlweise ein- oder ausgeblendet werden um deren individuelle Auswirkungen auf das Gesamtergebnis bewerten zu können.

Das Verfahren wird für statistisch relevante Anzahlen von Photonen durchgeführt und ist daher sehr rechenaufwändig. Je nach gewünschter Genauigkeit werden typischer Weise zwei Wochen Rechenzeit für die Erzeugung der 46 Projektionen einer Aufnahmegeometrie benötigt.

Im Ergebnis erhält man pro Geometrie jeweils 46 Projektionszeilen der modellierten Containerschicht. In den Zeilen der Projektionenfolgen ist jeweils die Restintensität am Zeilendetektor für jede Projektionsposition abgetragen.

Figur 6 zeigt die Folgen der untereinander zusammengefügt Zeilen-Projektionen für die drei betrachteten Aufnahmegeometrien.



**Figur 6.** Projektionenfolgen

Ebenfalls sichtbar ist die dunklere Färbung der rechten Bildhälfte. Dies wird durch die Anordnung der Beladung des Containers verursacht: dieser enthält in der rechts von der Hauptdurchstrahlungsrichtung liegenden Hälfte Objekte, die deutlich stärker Röntgenstrahlung absorbieren als entsprechende Objekte in der linken Hälfte.

#### 4. Rekonstruktion

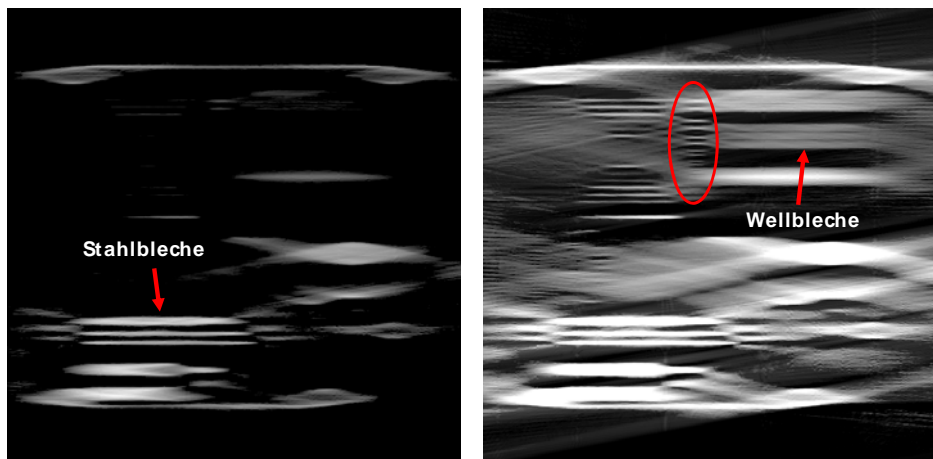
Die drei Projektionenfolgen werden nachfolgend jeweils mit einem Algorithmus der iterativen Rekonstruktionstechnik (ART) zu je einem Schnittbild rekonstruiert. Im Falle der Limited-Angle-CT wird alternativ eine gefilterte Rückprojektion („filtered backprojection“,



FBP) zur Rekonstruktion durchgeführt. Letztere kommt vorwiegend in der CT zum Einsatz und erfordert eine kreisbahnförmige Abtast-Geometrie.

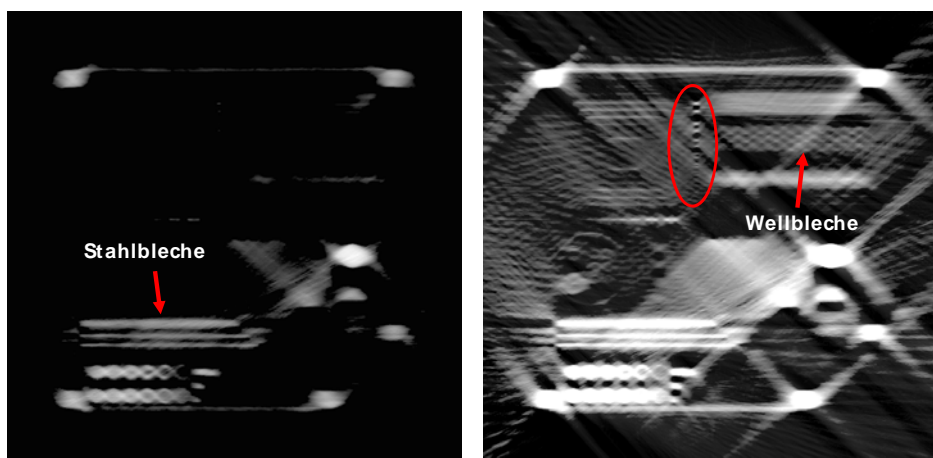
## 5. Ergebnisse

Figur 7 bis Figur 10 zeigen vier rekonstruierte Schnittbilder durch den virtuellen Container. Die darin befindlichen Grauwerte stehen für die orts aufgelöste Verteilung der berechneten Röntgen-Absorptionskoeffizienten des durchleuchteten Querschnitts des Containerinneren. Weil die im rekonstruierten Schnittbild berechnete 16 Bit-Dynamik zu bis zu 65.536 verschiedenen Grauwerten führt, die weder in einem Druckbild auf einmal gedruckt noch vom menschlichen Auge auf einen Blick in allen Nuancen erfasst werden können, werden die Ergebnisbilder jeweils in zwei Fensterungen dargestellt. Der obere Grauwertbereich gibt Werte von ca. 10.000 bis 65.535 und der untere Grauwertbereich Werte von 0 bis ca. 20.000 wieder.



Figur 7. ART-Rekonstruktion Parallelverschiebung (links: oberer, rechts: unterer Grauwertbereich)

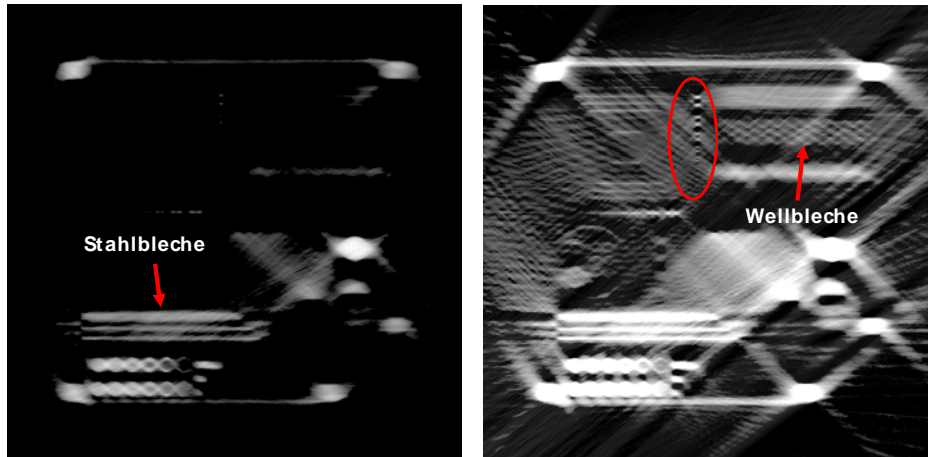
Das Ergebnisbild der Rekonstruktion der Aufnahme in Parallelverschiebungstechnik (Figur 7) ist von starken seitlichen Verwischungen gekennzeichnet. Die fünf Ecken des Containerschnitts lassen sich erahnen, Gleiches gilt für die senkrechten Doppeldraht-Muster. Insgesamt erscheinen Bilder dieser Art für Inspektionszwecke ungeeignet.



Figur 8. ART-Rekonstruktion gegenläufige Translationslaminographie

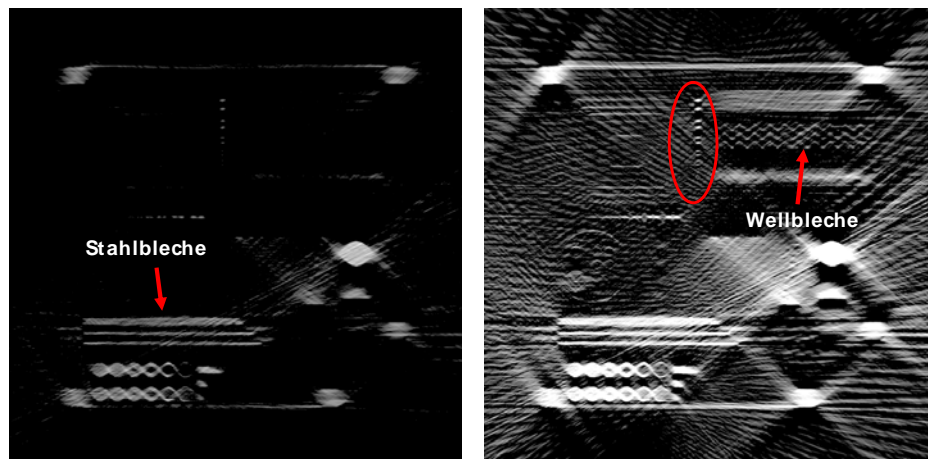
Bessere Ergebnisse liefert die gegenläufige Translationslaminographie (Figur 8). Hier sind bereits die ersten vier Doppeldraht-Muster bis zu 6 mm Durchmesser und

Abstand erkennbar. Ebenfalls sichtbar sind Containerwände, die Boxen unterschiedlichen Materials sowie die Röhrenreihen. Die Erkennbarkeit beschränkt sich allerdings im Wesentlichen auf Objektbestandteile, die parallel zur Hauptdurchstrahlungsrichtung liegen. Quer dazu gelagerte Objekte, wie z.B. auch die linken und rechten Rohrseiten bleiben verborgen.



**Figur 9.** ART-Rekonstruktion Limited-Angle-CT

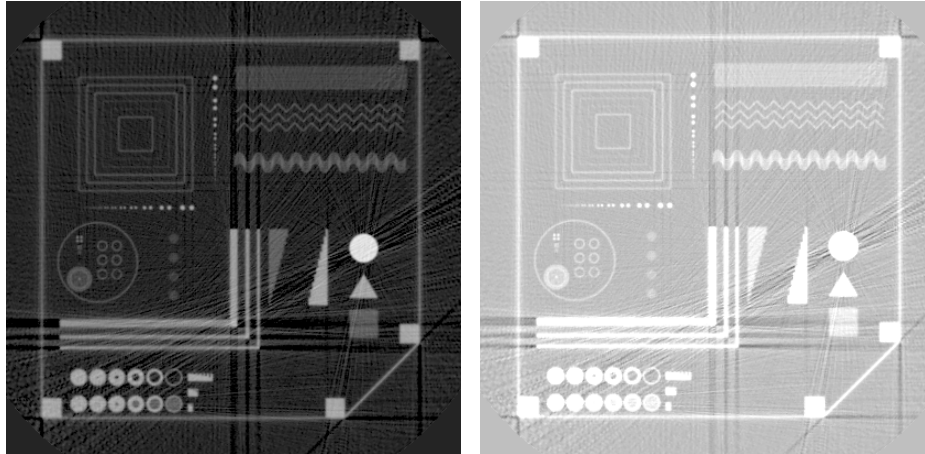
Eine sehr ähnliche Qualität wie die Ergebnisbilder der Translationslaminographie weisen die Bilder der Limited-Angle-CT auf (Fig. 9). Bei einer Auswahl zwischen beiden Verfahren kann man daher auf ersteres Verfahren zurückgreifen, dessen Linearachsen aus Sicht des Maschinenbaus mit geringerem Aufwand zu realisieren sind als die Kreisbahnbewegungen für Quelle und Detektor, welche eine Limited-Angle-CT erfordert.



**Figur 10.** FBP-Rekonstruktion zur Limited-Angle-CT

Für das vierte Ergebnis-Schnittbild (Figur 10) wurde die Rekonstruktion anstelle des algebraischen Algorithmus‘ mittels gefilterter Rückprojektion rekonstruiert. In diesem Falle werden weitere Details im Inneren des Containers sichtbar, auch die Wellblechstrukturen treten deutlicher zutage. Dies kann in erster Linie durch die gesteigerte Bildschärfe in Folge des Filterschrittes begründet werden. Die im Bild sichtbaren Artefakte verändern sich jedoch kaum.





**Figur 11.** Gefilterte Rückprojektion eines vollständigen CT-Datensatzes mit 400 Projektionen aus einer Kreisbahn der Röntgenquelle um das Objekt

Alle bis hierher betrachteten Verfahren zur Bildaufnahme und Rekonstruktion eines räumlich aufgelösten Schnittbilds beschränkten sich auf nur 46 Projektionen. Dies orientiert sich an den eingangs genannten Randbedingungen zur Minimierung der Bildaufnahmezeit und der applizierten Strahlungs dosis. Fügt man weitere Projektionen aus zusätzlichen, geschickt gewählten Blickrichtungen hinzu, so ergeben sich deutlich verbesserte Bildergebnisse. Dementsprechend sind in Figur 11 bereits nahezu sämtliche Objektdetails zu erkennen, die unterschiedlichen Helligkeitsstufen der Objekte geben die Materialunterschiede wieder.

## 6. Diskussion und Ausblick

Die in dieser Arbeit vorgestellten ersten Bildgebungsergebnisse anhand von Schnittbildern zeigen die Herausforderungen, aber auch die Möglichkeiten der 3-D-Bildgebung im Vergleich zur bisher ausschließlich verwendeten überlagerungsbehafteten 2-D-Bildgebung an Containern auf.

Die vorgestellte Methodik zur simulativen Bewertung von Röntgensystemen wird im weiteren Verlauf des Projekts ECSIT zur Entwicklung einer Volumenbildgebung an verdächtigen Teilbereichen für den Einsatz in der Containerinspektion fortgesetzt. Ebenfalls wird eine Verbesserung der bisher erzielten Bildqualität angestrebt. Besonderes Augenmerk wird hier auf das Verfahren der Translationslaminographie gelegt, welches durch das Hinzufügen von a-priori-Information über das Objekt und geschickt positionierte Aufnahme-Perspektiven ausgearbeitet werden kann. Weitere Aufnahmegeometrien zur 3-D-Volumenbildgebung werden ebenfalls in Betracht gezogen. Ziel ist, durch speziell an die Aufgabenstellung adaptierte Visualisierungstechniken die räumlich aufgelösten Bilddetails in Verbindung mit den 2-D-Basis scans der Container zu einer wertvollen Hilfe für die Beurteilung potentiell gefährlicher Inhalte im Container werden zu lassen.

Mit der Bereitstellung der Hochenergie-Testhalle des Fraunhofer EZRT in Fürth für Containeraufnahmen ab Mitte 2012 können die simulativ bestimmten Ergebnisse in der Realität überprüft werden. Anschließend wird die 3-D-Bildaufnahme hinsichtlich der resultierenden Bildqualität optimiert.

## Referenzen

[1] House Resolution No. 1 (H.R.1): Implementing Recommendations of the 9/11 Commission Act of 2007. Library of Congress, TITLE XVII—MARITIME CARGO. Obtained through the Internet: <http://www.govtrack.us/congress/billtext.xpd?bill=h110-1> (May 2011)

[2] Projekt ECSIT: <http://www.ecsit-security.eu>, Laufzeit 2010 bis 2013, Förderkennzeichen des BMBF: 13N10993

[3] Giersch, J. et al. (2003) 'ROSI —an object-oriented and parallel-computing Monte Carlo simulation for X-ray imaging', Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Vol. 509, pp. 151-156.