

Dual Energy Hochenergie-radiographie für die Materialdiskriminierung in Cargo-Containern: Von der Forschung zur Anwendung

Sanjeevareddy KOLKOORI *, Norma WROBEL *, Andreas DERESCH *,
Bernhard REDMER *, Uwe EWERT *

* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
(sanjeevareddy.kolkoori@bam.de)

Kurzfassung

Dual-Energy Röntgenradiographie im Bereich niedriger Energien (< 200 keV) ist eine bewährte Technik, die ihre Anwendung in der Medizin sowie auch in der Gepäckprüfung an Flughäfen findet. Medizinische Dual-Energy Systeme und Gepäckprüfanlagen arbeiten mit Röntgenenergien von 80 keV und 160 keV. Die zugehörigen Röntgenspektren sind klar voneinander getrennt. Dabei ist der effektive Schwächungskoeffizient (μ_{eff}) grundsätzlich von der Ordnungszahl (Z) abhängig, was zur Materialdiskriminierung genutzt wird. Im Gegensatz zu medizinischen Anwendungen ist bei der Untersuchung von Seefrachtcontainern die zu durchstrahlende Dicke weitaus höher (> 1 m), daher wird hier eine Energie im Bereich >1 MeV gewählt. Aufgrund der weniger guten spektralen Trennung im Hochenergiebereich ist μ_{eff} hier weniger abhängig von Z . Dabei spielen aber Dichteunterschiede eine Rolle und zusätzlich wird μ_{eff} von der Materialdicke (t) durch Aufhärtung beeinflusst. In diesem Beitrag wird die Dual-Energy Hochenergie-radiographie für die Untersuchung von Containern vorgestellt, bei der ein Betatron und ein hochauflösender Matrixdetektor ($200\mu\text{m}$) für die Bildgebung benutzt werden. Für die Messungen wurde ein Testphantom mit Stufenkeilen aus verschiedenen Materialien (Fe, Cu, Al, Sn, Mg, PMMA) untersucht. Die angewandten Energien für die Dual-Energy Bildgebung sind 3 MeV und 7.5 MeV mit 10 mm Cu-Vorfilter. Die Dual Energy-Funktion, welche das Verhältnis zwischen den Schwächungskoeffizienten niedriger und hoher Energie darstellt, wurde basierend auf dem simulierten, polychromatischen Röntgenspektrum und der Detektorempfindlichkeit mit dem aRTist Programm berechnet. Abschließend wurde die simulierte Dual-Energy Bildgebung mit den zugehörigen experimentellen Daten verglichen.

In einem zweiten Teil wird die praktische Anwendbarkeit der hochauflösenden mobilen Durchstrahlungsprüfung gezeigt. Dabei wurde ein ausgewählter Bereich eines heterogen gepackten Seefrachtcontainers auf dem BAM Testgelände „Technische Sicherheit“ in Horstwalde mit mobilem Gerät durchstrahlt. Abschließend werden diese Ergebnisse diskutiert, wobei der Packungsinhalt schrittweise komplexer gestaltet wurde.



Dual-Energy Hochenergieradiographie zur Materialerkennung in Cargo-Containern

Sanjeevareddy KOLKOORI, Norma WROBEL, Andreas DERESCH, Bernhard REDMER, Uwe EWERT
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

Motivation und Ziele:

- ZfP für Luftfracht- und Seefrachtcontainer
- Identifizierung von gefährlichen Materialien in Containern
- Entwicklung von mobiler Hochenergieradiographie
- Materialerkennung mittels Dual-Energy-Verfahren
- Verbesserung der Bildqualität durch den Einsatz von hochauflösenden Matrix-Detektoren
- Optimierung von Prüfparametern durch Anwendung der analytischen Simulationssoftware aRTist

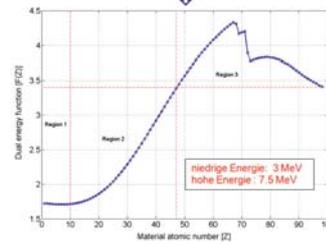


Dual-Energy Bildgebung: Theorie

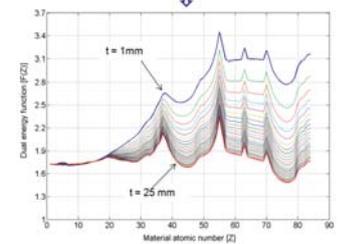
- effektiver Schwächungskoeffizient vs. Kernladungszahl

$$F(Z) = \frac{\mu_{\text{eff}}(Z)}{\mu_{\text{mat}}(Z)} = \frac{\int_{E_1}^{E_2} W(E_i) \mu(E_i, Z) dE_i}{\int_{E_1}^{E_2} W(E_i) \mu(E_i, Z) dE_i}$$

$$F(Z) = \frac{\mu_{\text{eff}}(Z)}{\mu_{\text{mat}}(Z)} = \frac{\log \left(\int_{E_1}^{E_2} W(E_i) e^{-\frac{\mu(E_i, Z)}{\rho(Z)} dx} dE_i \right)}{\log \left(\int_{E_1}^{E_2} W(E_i) e^{-\frac{\mu(E_i, Z)}{\rho(Z)} dx} dE_i \right)}$$



ohne Berücksichtigung der Materialwanddicke



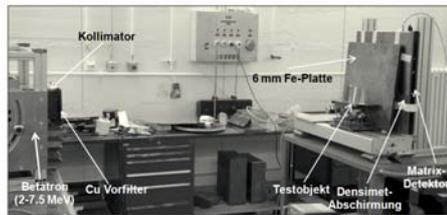
mit Berücksichtigung der Materialwanddicke

Vergleich: Messung und Simulation

- digitale Hochenergieradiographie
- 2D - Bildgebung

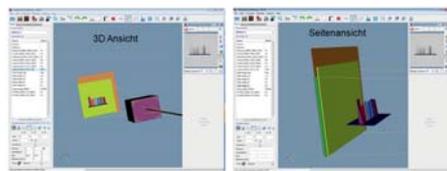


Messungen

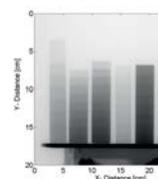


- aRTist - analytical Radiographic Testing inspection simulation tool
- polychromatisches Röntgenspektrum und Detektorempfindlichkeit

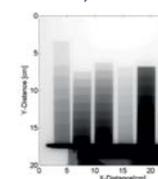
Simulation



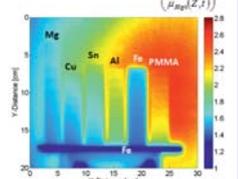
niedrige Energie: 3 MeV, 4 mm Cu-Filter



hohe Energie: 7.5 MeV, 10 mm Cu-Filter



Dual-Energy Bild



Hochauflösende mobile Durchstrahlung in der Containerprüfung:

20 Fuß-Container



- Vor-ort Untersuchung auf dem BAM Testgelände Technische Sicherheit (Horstwalde)
- Untersuchung ausgewählter Bereiche des Containers (region of interest - ROI)
- komplexer Containerinhalt = komplexe Bildauswertung
- besserer Kontrast zwischen niedrigen und hohen Z-Materialien



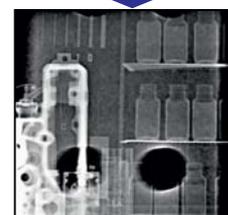
Strahlungsquelle: Betatron (7.5 MeV)

Matrix-Detektor: Pixelgröße: 200 µm

Containerinhalt



hochauflösende Durchstrahlungsbilder



Belichtungszeit: 5 min, Röntgenenergie: 7.5 MeV, SDD: 3.5 m, SNR: 500