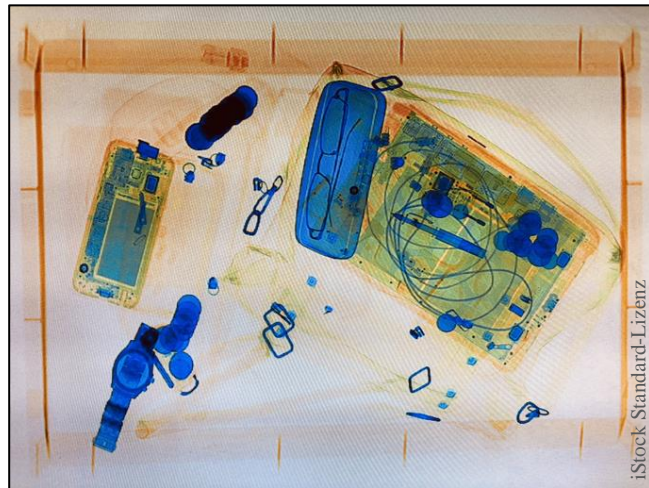


Gefährliche Stoffe identifizieren – eine echte Herausforderung

Moderne Gepäckscanner auf Flughäfen sind in der Lage, mit Hilfe von Röntgenstrahlen zwischen Materialien wie Glas, PVC, Metall und Sprengstoffen zu unterscheiden. Dies ist -vom physikalischen Standpunkt aus betrachtet- bemerkenswert, denn die Schwächung der Strahlung hängt ja nicht allein von der durchstrahlten Atomsorte ab, sondern auch von der Dicke und der Dichte des Materials. Eine dünne Eisenplatte ist mitunter im Röntgenbild kaum von einer dicken Schicht Sprengstoff zu unterscheiden.



Das folgende Rechenbeispiel für monochromatische Röntgenstrahlung mag dies verdeutlichen: Ein Stück Eisenblech (1mm stark) und ein Sprengstoffpaket (23 mm) liegen nebeneinander und werden von Röntgenphotonen der Energie 70 keV durchstrahlt. Aus den Tabellen des *National Instituts of Standards and Technology* (NIST) ermittelt man für diese Energie die folgenden linearen Absorptionskoeffizienten: $\mu_{\text{Eisen}} = 0,674 \frac{1}{\text{mm}}$ und $\mu_{\text{Spreng}} = 0,029 \frac{1}{\text{mm}}$. Die Intensität der Strahlung nach der Absorption ergibt sich aus der Formel: $I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot d}$, wobei d die Dicke des Materials in Millimetern ist. Wenn wir von 256 Graustufen im Röntgenbild ausgehen und für I_0 den maximalen Wert von 256 wählen, ergibt sich für die 1mm dicke Eisenplatte ein Grauwerte von $I_{\text{Fe}} = 256 \cdot e^{-0,674 \cdot 1} \approx 130$ und für das 23 mm dicke Sprengstoffpaket ein Wert von $I_{\text{Spreng}} = 256 \cdot e^{-0,029 \cdot 23} \approx 131$. Dies zeigt, dass beide Materialproben im Röntgenbild fast genau die gleiche Schwärzung zeigen und somit nicht unterscheidbar sind.

Wie also ist es möglich, dass man mithilfe von Röntgenstrahlung eine Unterscheidbarkeit herstellen kann?

Zwei Verfahren

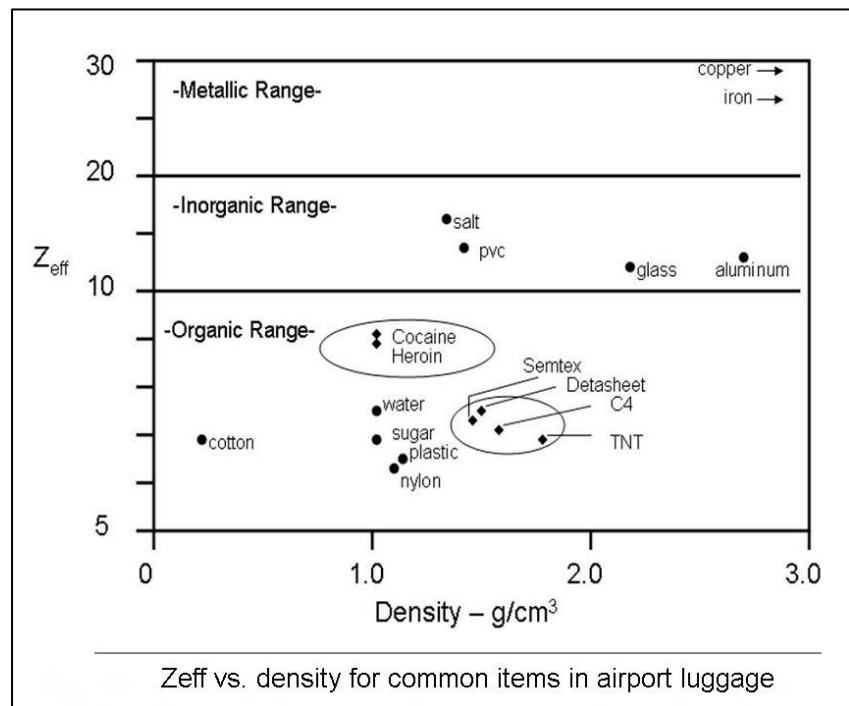
Im Folgenden sollen zwei Techniken erklärt werden – die zur Identifizierung unterschiedlicher Stoffe mithilfe von Röntgenstrahlung verwendet werden.

- Die verpackten Gegenstände (Gepäck, Kisten, Taschen und dergleichen) werden mit zwei unterschiedlichen Röntgenenergien durchleuchtet und im Röntgenbild unterschiedlich eingefärbt. Dies Verfahren nennt sich „Dual-Energy Absorptometry“.
- Beim sogenannten „Backscatter“-Verfahren wird die Rückstreuung von Röntgenphotonen aufgrund des Comptoneffekts ausgenutzt.

Das Dual-Energy-Verfahren

Der Trick besteht darin, die Materialproben nacheinander mit zwei deutlich verschiedenen Röntgenenergien zu durchstrahlen. So ergibt sich ein „Low-Energy-Bild“ und ein „High-Energy Bild“. Aus den unterschiedlichen Intensitäten der transmittierten Strahlung lassen sich Rückschlüsse auf die **Kernladungszahl Z** der Atome der Materialien ziehen. Man weiß nämlich, dass für den linearen Absorptionskoeffizienten von Röntgenstrahlung beim Durchgang durch Materie ungefähr die Proportionalität $\mu \sim \frac{Z^4}{E^3}$ gilt, wofür übrigens primär der Photoeffekt verantwortlich ist. In den differierenden Absorptionswerten der Strahlung bei verschiedenen Röntgenenergien stecken also Informationen über die Ordnungszahl Z. Diese sind von entscheidender Bedeutung, um die durchstrahlten Materialien klassifizieren zu können.

Die Abbildung¹ zeigt die effektiven Kernladungszahlen Z_{eff} verschiedener Stoffe. Es fällt auf, dass problematische Produkte wie Sprengstoffe und Drogen sämtlich Z_{eff} -Werte unter 10 aufweisen. Bei metallartigen Stoffen finden wir dagegen Werte, die deutlich über 20 liegen.



Die folgende Tabelle² verdeutlicht nochmal etwas detaillierter, dass Materialien, die aus den Elementen Wasserstoff (${}_1\text{H}$), Kohlenstoff (${}_6\text{C}$), Stickstoff (${}_7\text{N}$) und Sauerstoff (${}_8\text{O}$) zusammengesetzt sind, stets effektive Kernladungszahlen deutlich unter 10 aufweisen. Dazu gehören harmlose Stoffe wie wasserhaltige Getränke, Zucker, Plastik aber auch diverse Sprengstoffe, wie Semtex, TNT, C-4 und andere.

¹ Eilbert, R. F. and Krug, K. D. (1993). Aspects of image recognition in Vivid technologies' dual-energy X-ray system for explosives detection. In Proceedings of SPIE, volume 1824, pages 127{143.

² 1718020209.pdf

Table Selection of explosives and precursor explosive media, ordered by effective atomic number, Z_{eff} , for the penetrating x-ray energy range of interest, together with the number of contributing electrons per atom of C, H, N, O, total number of electrons per molecule, n_e and mass density, ρ_{rel} , relative to water. Also included are a number of harmless media for which discrimination through use of x-ray absorptiometry may be challenged.

	Nature	C	H	N	O	n_e	Z_{eff}	ρ_{rel}
Polyethylene	Polymer	2	4			16	5.5	~ 0.9
PMMA	Polymer	5	8		2	54	6.5	1.18
Acetone peroxide: TATP (dimer)	Explosive	6	12		4	80	6.7	0.7
Acetone peroxide: TATP (trimer)	Explosive	9	18		6	120	6.7	
HMTD	Explosive	6	12	2	4	94	6.8	0.9
Sorbitol	Sugar	6	14		6	98	6.9	1.5
Uric acid ($\text{C}_5\text{H}_4\text{N}_4\text{O}_3$)	Precursor	5	4	4	3	86	6.9	1.9
Sugar (Saccharose)	Sugar	12	22		11	182	6.9	1.6
Fructose	Sugar	6	12		6	96	7.0	1.5
Delrin	Polymer	1	2		1	16	7.0	1.4
TNT	Explosive	7	5	3	6	116	7.1	1.7
Ammonium picrate (Dunnite)	Explosive	6	6	4	7	126	7.2	1.7
Nitromethane	Explosive	1	3	1	2	32	7.2	1.1
Cyclonite (RDX)	Explosive	3	6	6	6	114	7.2	1.8
HMX (Octogen)	Explosive	4	8	8	8	152	7.2	1.9
Nitrocellulose	Explosive	6	7	3	11	152	7.3	1.3
PETN (Penthrite)	Explosive	5	8	4	12	162	7.4	1.8
Ammonium nitrate	Explosive		4	2	3	42	7.4	1.8
H_2O	Water		2		1	10	7.4	1.0
H_2O_2	Precursor		2		2	18	7.7	1.5
H_2O_2 (1/3) + H_2O (2/3)	Precursor							
Black Powder*	Carboniferous							0.9
Chlorate powder (ClCO_3)	Inorganic salt							1.45
C4 (RDX + Liant)	Explosive							1.4
Semtex	Explosive							1.48
Dynamite	Explosive							1.4

Für die Klassifizierung von Materialien durch Gepäckscanner orientiert man sich an folgender Festlegung:

- Organisches Material: $Z < 10$
- Anorganisches Material: $10 \leq Z \leq 20$
- Metalle: $Z > 20$

Durch das Dual-Energy-Verfahren ist es möglich, die durchstrahlten Materialien nach dieser Regel zu klassifizieren und in einem Falschfarbenbild einzufärben. Dabei werden organische Stoffe meist rot-braun, anorganische grünlich und metallische bläulich koloriert. Die folgenden Bilder zeigen solche typischen Falschfarbendarstellungen:



Erstellung einer Z-Map:

Wie lassen sich nun aus zwei Röntgenbildern, die mit verschiedenen Energien aufgenommen wurden, Informationen über die Ordnungszahl Z der Elemente erlangen?

Die Absorption von Röntgenstrahlung folgt der Gesetzmäßigkeit $I(d) = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot d}$, wobei μ der lineare Absorptionskoeffizient ist³.

Für die Intensitäten der Durchstrahlung mit hoher und mit niedriger Energie gelten dann die Formeln: $I_H = I_0 \cdot e^{-\mu_H \cdot x}$ und $I_L = I_0 \cdot e^{-\mu_L \cdot x}$.

Division durch I_0 und logarithmieren ergibt dann: $\ln\left(\frac{I_H}{I_0}\right) = -\mu_H \cdot x$ und $\ln\left(\frac{I_L}{I_0}\right) = -\mu_L \cdot x$.

³ In den Tabellen des *National Instituts of Standards and Technology* (NIST) wird anstelle des linearen Absorptionskoeffizienten μ der „Massenschwächungs-Koeffizient“ $r = \mu/\rho$ angegeben, bei dem die Dichte ρ eingeht. Bei bekannter Dichte des Materials lässt sich r leicht in μ umrechnen.

Division der beiden Gleichungen führt zu:

$$\frac{\ln\left(\frac{I_H}{I_0}\right)}{\ln\left(\frac{I_L}{I_0}\right)} = \frac{\mu_H}{\mu_L} \Leftrightarrow \ln\left(\frac{I_H}{I_0}\right) = \frac{\mu_H}{\mu_L} \cdot \ln\left(\frac{I_L}{I_0}\right).$$

Anwendung der e-Funktion:

$$\frac{I_H}{I_0} = e^{\frac{\mu_H}{\mu_L} \cdot \ln\left(\frac{I_L}{I_0}\right)} = \left(e^{\ln\left(\frac{I_L}{I_0}\right)} \right)^{\frac{\mu_H}{\mu_L}} = \left(\frac{I_L}{I_0} \right)^{\frac{\mu_H}{\mu_L}}.$$

Aus $\frac{I_H}{I_0} = \left(\frac{I_L}{I_0} \right)^{\frac{\mu_H}{\mu_L}}$ wird dann:

$$I_H = \frac{I_0}{\left(I_0 \right)^{\frac{\mu_H}{\mu_L}}} \cdot I_L^{\frac{\mu_H}{\mu_L}} = \left(I_0 \right)^{1 - \frac{\mu_H}{\mu_L}} \cdot I_L^{\frac{\mu_H}{\mu_L}}.$$

Die Intensität I_H , die sich bei der hohen Energie ergibt, ist also wie folgt mit der Intensität I_L

der niedrigen Energie verknüpft:

$$I_H = \left[\left(I_0 \right)^{1 - \frac{\mu_H}{\mu_L}} \right] \cdot I_L^{\frac{\mu_H}{\mu_L}}.$$

Dies ist eine Potenzfunktion

der Form $f(x) = a \cdot x^b$, wobei der Variablen x die Intensität I_L entspricht.

Für die Klassifizierung von Materialien, die in einem Gepäck-Röntgenscanner durchleuchtet werden, ist die Kenntnis der Kernladungszahl Z der Atome von entscheidender Bedeutung, wie bereits erläutert wurde. Daher erstellen wir nach der oberen Funktion eine I_L - I_H -Kurve für ein Material mit der Kernladungszahl $Z=10$ und eine mit der Kernladungszahl $Z=20$. In einem I_L - I_H -Koordinatensystem teilen diese beiden Kurven die Ebene in drei Bereiche auf - organisch, gemischt und anorganisch.

Als Referenzmaterialien für eine geeignete Z -Map wählen wir das Element **Kalzium** (Ca), das eine Kernladungszahl von $Z=20$ aufweist und **Magnesiumoxyd** (MgO), dessen effektive Kernladungszahl sehr nahe bei 10 liegt, also $Z_{\text{eff}}=10$. Für beide Stoffe erstellen wir jeweils eine Kurve mit Hilfe der oben hergeleiteten Potenzfunktion.

Für **Kalzium** (Ca) ergeben die Daten des NIST⁴ die folgenden Werte:

Bei einer Röntgenenergie von 100 keV: $\mu_H = 0,399 \frac{1}{\text{cm}}$.

Bei einer Röntgenenergie von 70 keV: $\mu_L = 0,731 \frac{1}{\text{cm}}$.

Der Quotient ergibt: $\frac{\mu_H}{\mu_L} = 0,545$ und damit: $I_H = (256)^{1-0,545} \cdot I_L^{0,545}$.

⁴<https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>

Die I_L - I_H -Kurve lautet also für **Kalzium (Z = 20)**: $I_H = 12,467 \cdot I_L^{0,545}$.

Wir gehen dabei von 256 Graustufen als Intensitätsabstufungen aus und haben I_0 auf den Maximalwert 256 gesetzt.

Für **Magnesiumoxyd (MgO)** ergeben die Daten:

Bei einer Röntgenenergie von 100 keV: $\mu_H = 0,567 \frac{1}{\text{cm}}$.

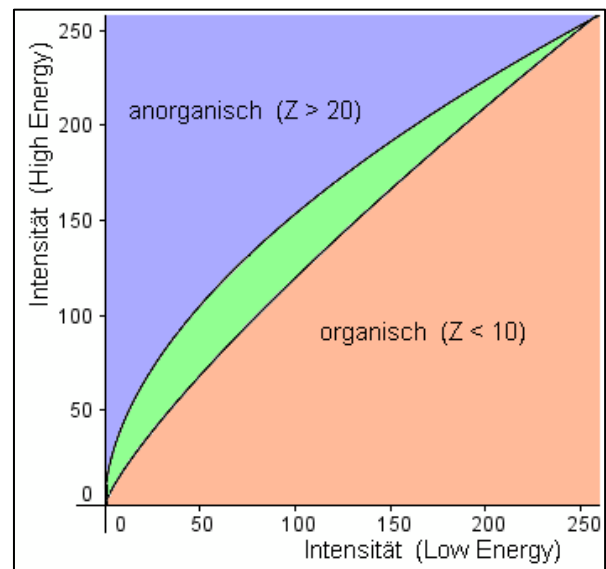
Bei einer Röntgenenergie von 70 keV: $\mu_L = 0,707 \frac{1}{\text{cm}}$.

Der Quotient ergibt: $\frac{\mu_H}{\mu_L} = 0,802$ und damit: $I_H = (256)^{1-0,802} \cdot I_L^{0,802}$.

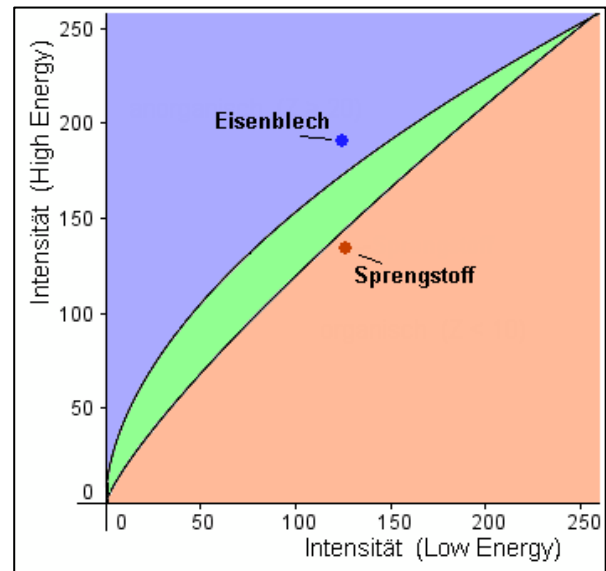
Die I_L - I_H -Kurve lautet also für Natrium $I_H = 2,998 \cdot I_L^{0,802}$

Wenn wir beide Funktionen in ein I_L - I_H -Koordinatensystem einzeichnen, ergibt sich das nebenstehende Diagramm.

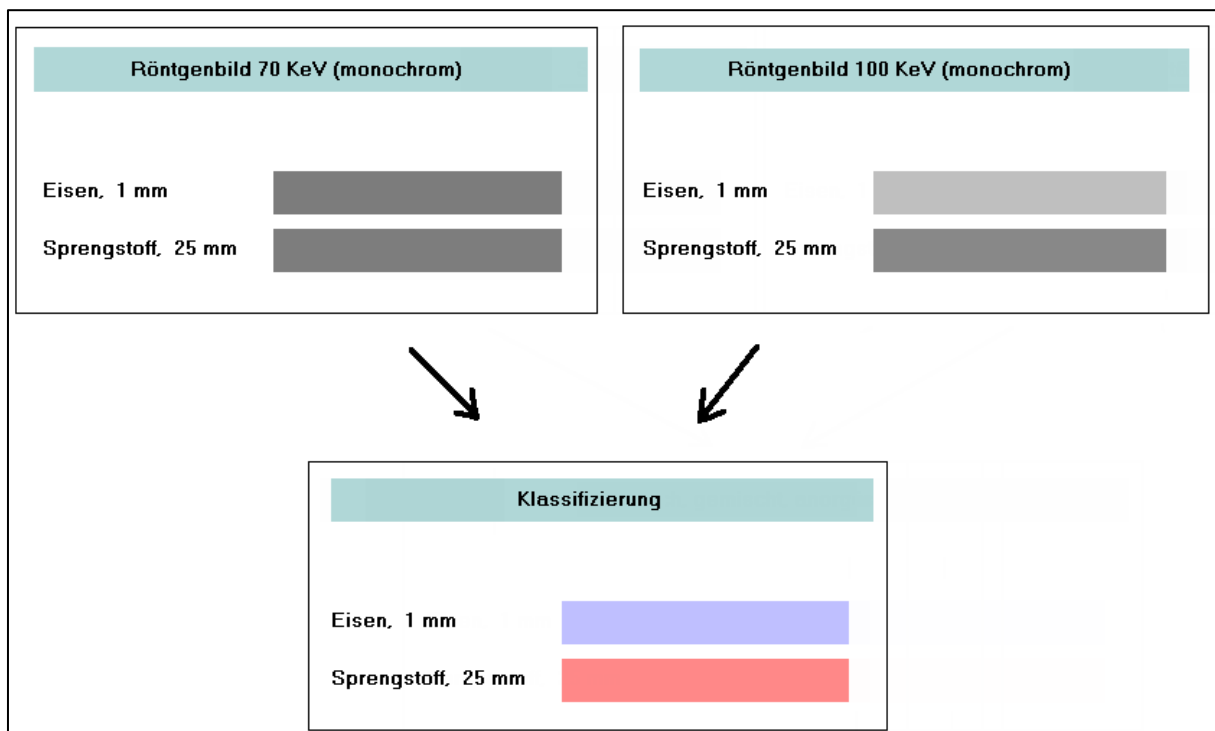
Die obere Kurve, sie gilt für Kalzium, begrenzt den Bereich der metallisch-anorganischen Materialien. Die untere Kurve zeigt Magnesiumoxyd und begrenzt den Bereich der organischen Substanzen. Wird also ein Stoff mit zwei verschiedenen Röntgenenergien nacheinander durchleuchtet, entstehen zwei verschiedene Intensitäten. Tragen wir diese für ein bestimmtes Pixel als Koordinaten im oberen Diagramm ein, können wir entscheiden, um welche Art von Material es sich an dieser Stelle handelt.



Als Beispiel betrachten wir die Röntgenbilder, die bei der Durchstrahlung von einem 1mm dicken Eisenblech und einer 25mm-Schicht Sprengstoff entstehen. Beide Materialproben sind im monochromatischen Röntgenbild (70 keV) nicht unterscheidbar, wie wir oben bereits erfahren haben. Die Auswertung der Grauwerte (0-schwarz, 256 weiß) ergibt für das Eisenblech das I_L - I_H -Wertepaar (124 / 191) und für den Sprengstoff (124 / 136). Tragen wir die Koordinaten in die Z-Map ein, erkennen wir sofort, dass das erste Material anorganisch (metallisch) ist und das zweite organisch. Entsprechend werden die Bereiche im Falschfarbenbild eingefärbt. Es könnte sich also beim rot-braun dargestellten Material um Flüssigkeiten wie Wasser, Saft usw. oder Kosmetika, wie Shampoo, Cremes und dergleichen oder aber auch Sprengstoff handeln. Daher darf man im Handgepäck auch keine Getränkeflaschen oder ähnliches mitnehmen, weil das kaum von Sprengstoff zu unterscheiden ist.



Die untere Darstellung zeigt nochmal, wie aus den verschiedenen Intensitäten des Low-Energy-Bildes und des High-Energy-Bildes ein Falschfarbenbild entsteht.



Die Wirklichkeit ist komplizierter

Die oberen Überlegungen zur Erstellung einer Z-Map, die eine Klassifizierung der durchleuchteten Materialien ermöglicht, gingen davon aus, dass es sich bei dem High-Energy-Scan und dem Low-Energy-Scan jeweils um monochromatische Röntgenstrahlung handelt. Die oben verwendeten Absorptionskoeffizienten für die Erstellung der Z-10 und Z-20 Kurven, gelten daher nur für die beiden Energien von 70 keV und 100 keV. Monochromatische Röntgenstrahlung dieser Energien lässt sich in ausreichender Intensität aber nicht herstellen. Röntgenröhren liefern stets ein kontinuierliches Spektrum. Natürlich lässt sich ein solches Spektrum durch die geschickte Wahl von Filtermaterialien und Röhrenspannungen in gewisser Weise modulieren - dennoch wird man stets ein mehr oder weniger breites Wellenlängenband zur Durchstrahlung benutzen müssen. Die Grenzziehung in der Z-Map für die Zuordnung von organischen und anorganischen Materialien ist daher einigermaßen unscharf.

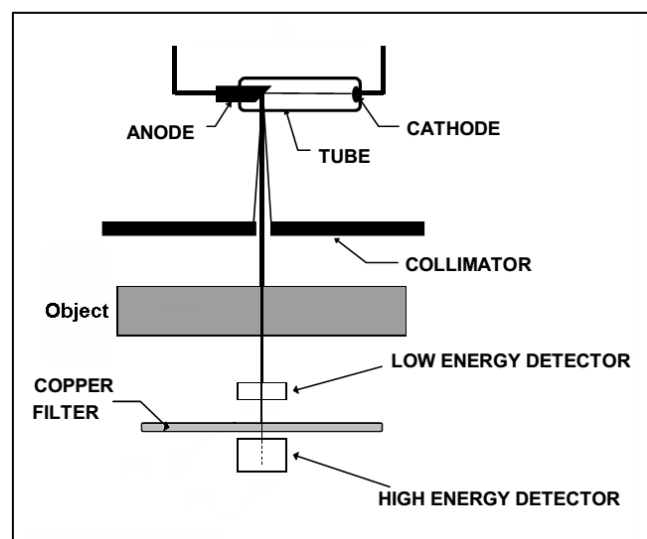
Diese Schwierigkeiten lassen sich zufriedenstellend nur umgehen, wenn die Referenzkurven im I_L - I_H -Koordinatensystem experimentell bestimmt werden. Nehmen wir an, man hat aus dem Spektrum der Röntgenröhre den niederenergetischen Bereich durch eine passende Filterung hervorgehoben. Diese Strahlung schickt man nun durch verschieden dicke Kalzium- und Magnesiumoxydschichten und zeichnet die entstehenden Intensitäten auf. Die Messreihe wird danach mit einem höherenergetischen Spektralbereich der Röntgenröhre wiederholt. Aus den zahlreichen Messwerten der Schichtdicke und Durchlässigkeit lassen sich durch mathematische Verfahren dann effektive Absorptionskoeffizienten für die beiden Referenzmaterialien und die gewählten Spektralbereiche ermitteln. Erst mit diesen Daten ist man dann in der Lage, eine zuverlässige Z-Map zur Identifikation bestimmter Stoffe zu erstellen.

Alle Gepäckscanner müssen diese komplizierte **Kalibrierungsprozedur** durchlaufen, bevor sie auf Flughäfen oder in anderen Anwendungsbereichen eingesetzt werden können.

Techniken der Dual-Energy Gepäckscanner

Im Folgenden sollen zwei verschiedene und häufig eingesetzte technische Realisierungen des Dual-Energy-Verfahrens erklärt werden.

Bei dem Single-Source-Verfahren (manchmal auch als „Pseudo Dual Energy System“ bezeichnet) werden die beiden Rohbilder, also das bei kleiner und das bei hoher Röntgenenergie, innerhalb eines einzigen Scandurchlaufes gleichzeitig erzeugt. Dies wird durch die abgebildete Anordnung der Geräteteile ermöglicht⁵.

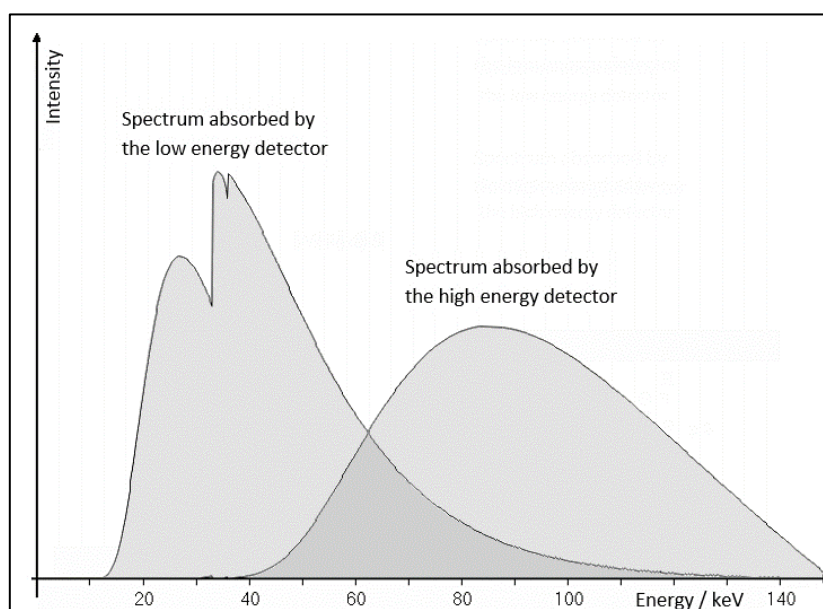


⁵ <https://doi.org/10.1117/12.420922>

Wie die Röntgenphotonen mit den verschiedenen Materialien wechselwirken, zeigen die Darstellungen auf der folgenden Seite. Wir betrachten zunächst die Situation, dass das zu untersuchende Objekt nicht existiert, das Röntgenspektrum der Wolframanode also ungeschwächt auf den ersten Detektor fällt. Da dieser aus einer nur 0,3 mm dicken Sensorschicht (Szintillator) aus Cäsiumiodid (CsI) besteht, werden vor allem die niederenergetischen Photonen in diesem Detektor absorbiert, während die höherenergetischen kaum wechselwirken und durch die Schicht hindurchgehen. Das Spektrum, das von dieser Detektorschicht eingefangen wird, enthält daher überwiegend niederenergetische Anteile. Die durchgehende Strahlung, die größtenteils bereits vom langwelligen Teil beim Durchgang durch den ersten Detektor befreit wurde, muss dann eine 0,7 mm dicke Kupferfolie durchlaufen, die das Spektrum noch gründlicher vom niederenergetischen Teil säubert. Die übrig gebliebenen Photonen hoher Energie erreichen den zweiten Detektor, dessen Sensorschicht 5 mm dick ist, so dass die Strahlung dort vollständig absorbiert wird und das High-Energy-Bild liefert. So entstehen zwei Röntgenspektren, die verschiedene Energiemaxima aufweisen und somit zwei Röntgenbilder bei unterschiedlicher Energie.

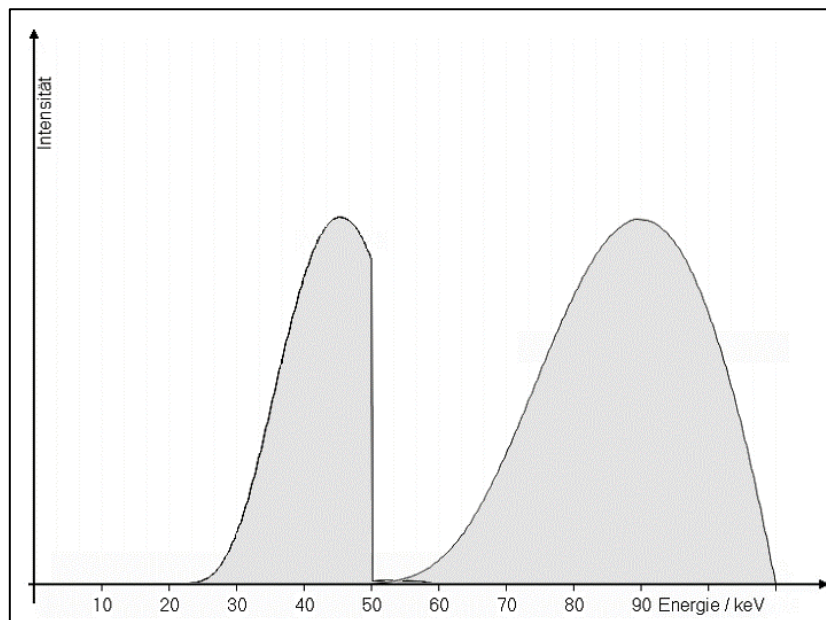
Dieses Single-Source-Verfahren hat den Vorteil, dass mit einem einzigen Scanvorgang beide Intensitätsbilder hergestellt werden können. Allerdings ist die Separation zwischen hoher und niedriger Röntgenenergie mitunter nicht sehr scharf, was die Kalibrierung und Herstellung einer aussagekräftiger Z-Map erschwert.

Die untere Abbildung zeigt ein typisches Simulationsergebnis. Die Röntgenröhre hat eine Kupferanode und wird mit einer Anodenspannung von 150 kV betrieben. Zudem wird die Strahlung mit 2 mm Aluminium gefiltert, bevor sie das Objekt und die erste dünne Detektorschicht (0,3 mm Cäsium-Iodid) durchläuft. Danach passiert sie eine 0,7 mm dicke Kupferfolie um schließlich in dem 5mm dicken CsI-Detektor absorbiert zu werden. Die Energiemaxima sind zwar deutlich voneinander getrennt, aber dennoch überlappen sich beide Spektren aufgrund ihrer weiten Ausdehnung.



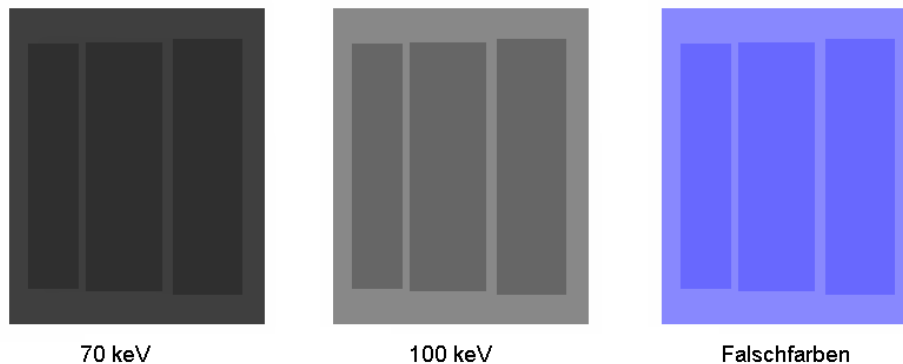
Bessere Ergebnisse liefert das sogenannte „True Dual Energy System“. Dabei wird das Objekt zweimal hintereinander gescannt – einmal mit hoher Energie und einem passenden Filter zur Hervorhebung der kurzen Wellenlängen und einmal mit niedriger Energie und entsprechender Filterung für große Wellenlängen. Dafür kann eine einzige Röntgenröhre verwendet werden, deren Betriebsspannung zwischen den Scans umgeschaltet wird und deren Filter automatisch gewechselt werden.

Die linke Kurve in dem unten abgebildeten Spektrum wurde mit einer Röhrenspannung (Kupferanode) von 60 kV und einem Kantenfilter aus 0,4 mm Gadolinium (${}_{64}\text{Gd}$) erzeugt und die rechte Kurve mit 110 kV und einem Kupferfilter, der eine Dicke von 4 mm aufwies. Es ist deutlich zu erkennen, dass zwei gut voneinander separierter Spektralbereiche für das Low-Energy-Bild und das High-Energy-Bild entstehen, was zu rauschärmeren und kontrastreicheren Bildern führt und die Erstellung der Z-Map erleichtert. Der Nachteil des Systems ist der doppelte Zeitaufwand, weil ja zwei Scanvorgänge notwendig sind.



Das Backscatter-Verfahren

Das oben beschriebene Verfahren der Durchleuchtung mit zwei Energien stößt dann an seine Grenzen, wenn leichte Materialien, wie z.B. Plastiksprengstoff hinter Materialien mit hoher Kernladungszahl (Eisen, Kupfer, Blei) versteckt werden. Nehmen wir als Beispiel an, in einem Koffer befindet sich eine Schachtel aus starkem Eisenblech - Boden und Deckel sollen eine Dicke von jeweils 1,2mm aufweisen. In dieser Metallbox wurden 3 Streifen Sprengstoff (Semtex) mit einer Dicke von 1 cm versteckt. Würde die Schachtel mit dem Dual-Energy-Verfahren durchleuchtet, nämlich mit den beiden Energien von 70 keV und 100 keV, würde die Zuordnung der Intensitäten in der Z-Map das untere Ergebnis erzeugen. Die Werte wurden nach den Absorptionsdaten (mass attenuation coefficients) des NIST berechnet und in Grauwerte umgesetzt (s. Anhang).



Da sich die beiden Materialien bei der Durchleuchtung überlappen und das Eisenblech verhältnismäßig dick ist, lässt sich im Falschfarbenbild nicht mehr erkennen, dass das versteckte Material eine Kernladungszahl unter 10 hat - also organischen Ursprungs ist. Es müsste demnach orange gefärbt sein. Vielmehr sieht es aber so aus, als ob dort drei Stücke eines anorganischen Materials, vielleicht aus Eisen oder Kupfer, liegen würden.

Solche **Überlappungsprobleme** lassen sich in vielen Fällen mithilfe der rückgestreuten Strahlung (Backscatter) erfolgreich umgehen. Dieses interessante und leistungsstarke Verfahren soll im Folgenden eingehender erklärt werden.

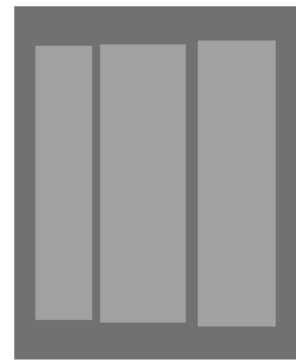
Röntgenphotonen können im Wesentlichen durch den Photoeffekt, den Comptoneffekt und die Rayleighstreuung mit der bestrahlten Materie wechselwirken. Die Rayleigh-Streuung soll im Weiteren vernachlässigt werden, da sie im Wellenlängenbereich von Röntgenscannern im Vergleich zu den beiden anderen Wechselwirkungen nur eine sehr geringe Rolle spielt.

Die Wahrscheinlichkeit dafür, ob ein Röntgenphoton über den Photoeffekt oder über den Comptoneffekt wechselwirkt, ist abhängig von der Wellenlänge der Strahlung und der Kernladungszahl Z des durchstrahlten Materials. Besonders letzteres ist bei der Erkennung von problematischen Stoffen wie Sprengstoffen oder Drogen wesentlich, denn diese weisen in der Regel Kernladungszahlen deutlich unter $Z=10$ auf. Die beiden unteren Diagramme zeigen, wie

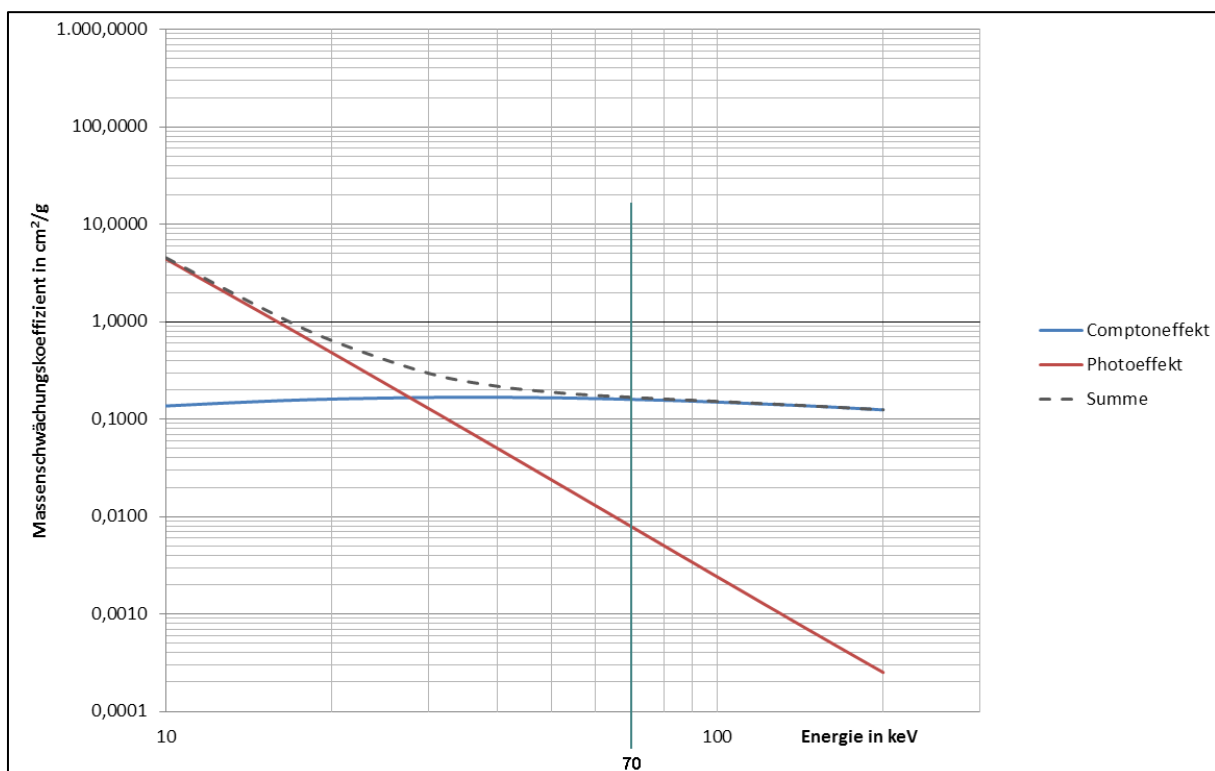
sich die Absorption der Röntgenstrahlung bei verschiedenen Stoffen auf Compton- und Photoeffekt verteilt.

Semtex ist ein formbarer Plastiksprengstoff auf der Basis von Nitropenta (PETN) mit der Strukturformel $C_5H_8N_4O_{12}$. Die Dichte beträgt 1778 kg/m^3 und die effektive Kernladungszahl $Z_{\text{eff}} = 7,4$. Das zweite Diagramm zeigt das Absorptionsverhalten von Eisen mit $\rho = 7860 \text{ kg/m}^3$ und $Z = 26$.

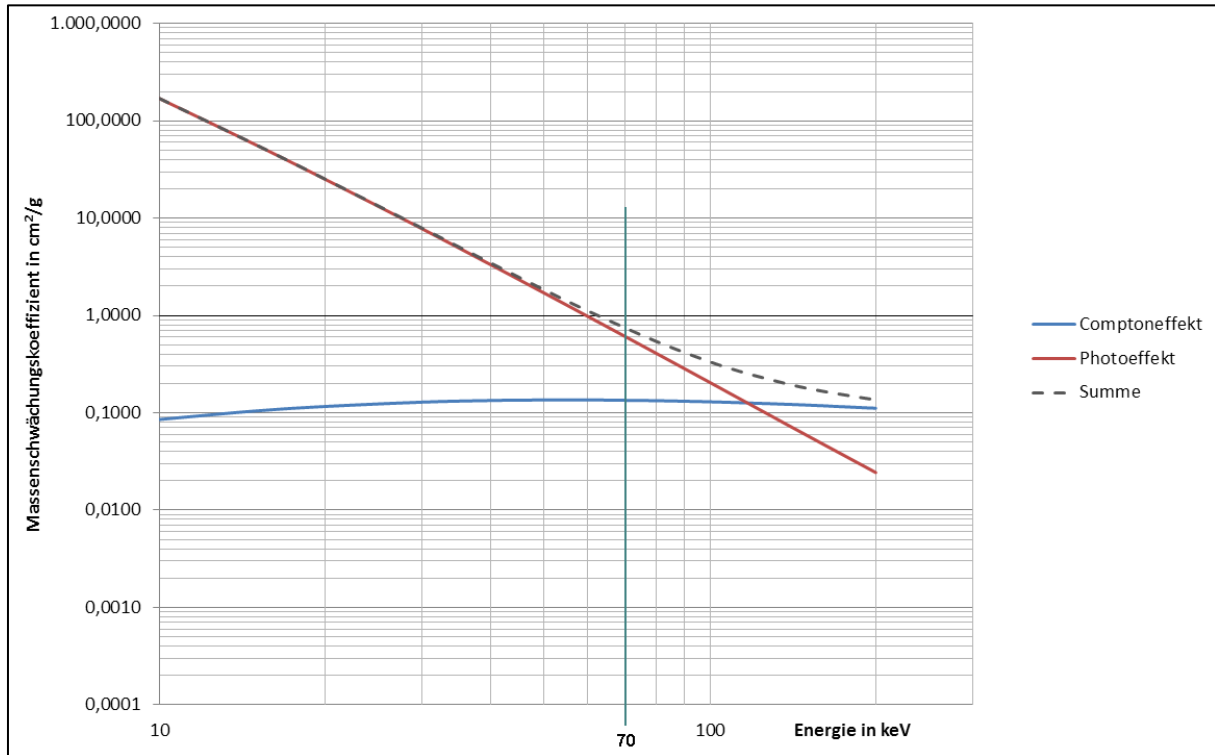
Die extrem unterschiedliche Verteilung von Compton- und Photoeffekt auf den Absorptionsprozess fällt deutlich ins Auge, wie die unteren beiden Diagramme zeigen. Während der Comptoneffekt bei Semtex und Eisen nahezu die gleiche Wirkung zeigt, ergibt der Photoeffekt beim Sprengstoff Semtex und bei Eisen deutlich unterschiedliche Werte des Schwächungskoeffizienten – der Comptoneffekt dominiert eindeutig bei Semtex. Bei einer Röntgenenergie von 70 KeV beträgt der Anteil der Comptonschwächung bezüglich der Gesamtaborption bei Eisen etwa 18%, beim Sprengstoff Semtex dagegen etwa 95%. Materialien mit kleiner effektiver Kernladungszahl weisen stets eine sehr starke Streuung der Photonen aufgrund des Comptoneffekts auf. So kann sich daher ein Röntgenbild ergeben, bei dem sich der Sprengstoff mit höherer Intensität abzeichnet. Aufgrund der starken Comptonstreuung „leuchtet“ der Sprengstoff quasi durch das Eisenblech hindurch.



Rückstreubild der Metallschachtel mit gefährlichem Inhalt

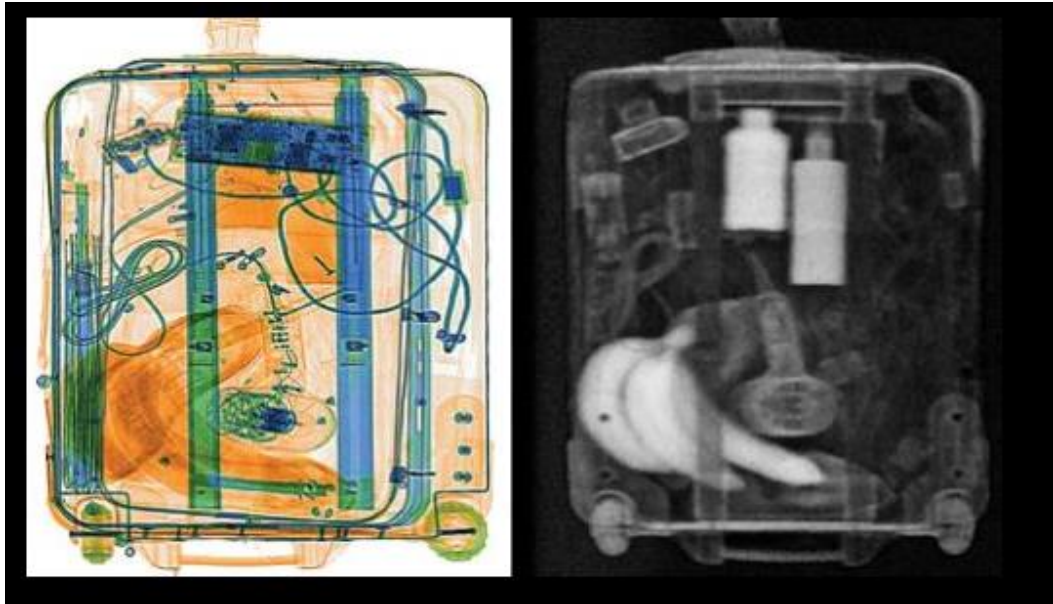


Absorption von Röntgenstrahlung durch SEMTEX



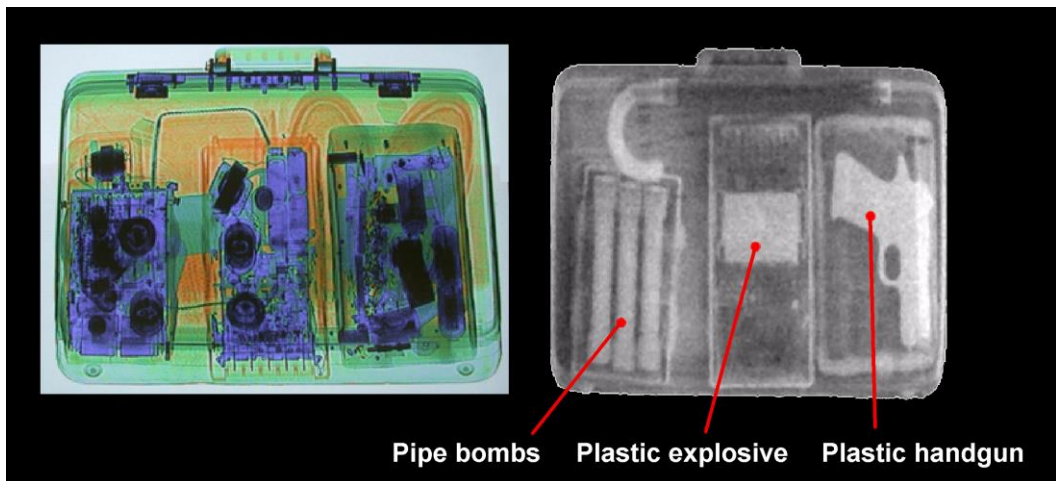
Absorption von Röntgenstrahlung durch Eisenblech

Dieses Phänomen ermöglicht beeindruckende Erfolge bei der Identifizierung gefährlicher Stoffe, wie die folgenden Beispiele zeigen sollen, bei denen zwei Koffer mit dem Dual-Energy-Verfahren durchleuchtet und außerdem mit der Backscatter-Methode abgebildet wurden. Die organischen Materialien in Form von Bananen und Flüssigsprengstoff sind im Durchleuchtungsbild nur schemenhaft bis gar nicht auszumachen – im Backscatter-Bild dagegen treten sie deutlich hervor – die Comptonphotonen überstrahlen alle anderen, schweren Materialien im Koffer und der Umgebung. Auch das zweite Beispiel darunter demonstriert, wie sich versteckte gefährliche Materialien mit niedriger Kernladungszahl durch die rückgestreuten Photonen deutlich abzeichnen.



Rapiscan Systems

Dual-Energy-Bild und Backscatter-Bild eines Koffers

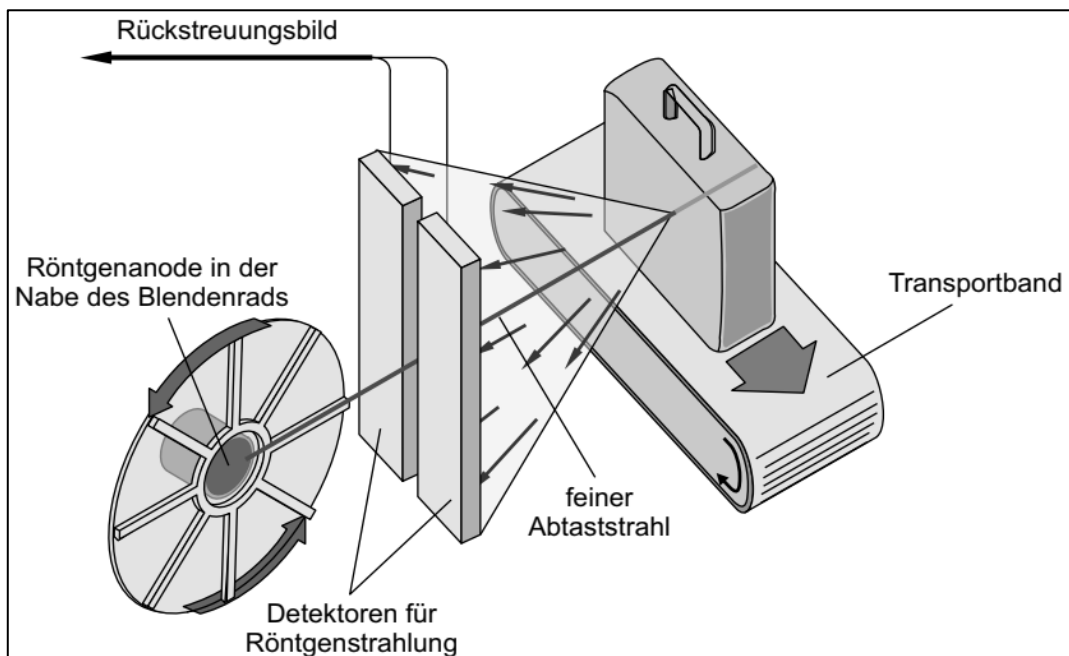
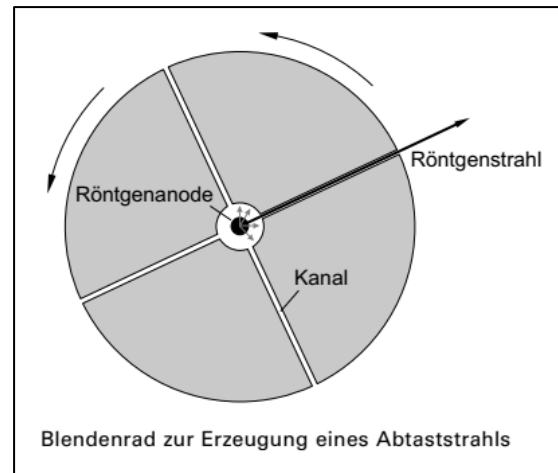


Rapiscan Systems

Gefährliche Materialien aus leichten Atomen treten im Backscatter-Bild deutlich hervor

Aufbau einer Backscatter-Apparatur

Um aus den zurückgestreuten Photonen ein Gesamtbild erstellen zu können, wird das zu untersuchende Objekt mit einem einzigen, feinen Röntgenstrahl zeilenweise abgescannt. Allerdings lassen sich Röntgenstrahlen nicht einfach durch elektrische oder magnetische Felder ablenken, steuern und formen. Eine häufig verwendete Methode besteht darin, aus dem stark divergenten Strahlenbündel, das von der Röntgenanode ausgeht, durch bewegliche Blenden die passenden Strahlen auszuwählen. Die Abbildung zeigt ein sogenanntes „Chopper-Wheel“, ein Rad, das aus Metall besteht und über feine, speichenförmige Kanäle verfügt. Die Röntgenanode befindet sich in der Nabe dieses Rades und erzeugt ein divergentes Strahlenbündel, von dem durch die sich bewegenden Bohrungen nur einzelne Röntgenstrahlen nach außen gelangen. Da das Rad rotiert, entsteht ein Abtaststrahl, der sich mit großer Geschwindigkeit von oben nach unten bewegt. Gleichzeitig wird das Objekt langsam weiterbewegt, so dass ein kompletter Scan ermöglicht wird. Die rückgestreuten Photonen werden durch zwei Detektoren registriert.



Aus der bekannten Position des Abtaststrahls und den dazugehörigen rückgestreuten Röntgenphotonen wird dann pixel- und zeilenweise ein Gesamtbild des Objekts hergestellt.

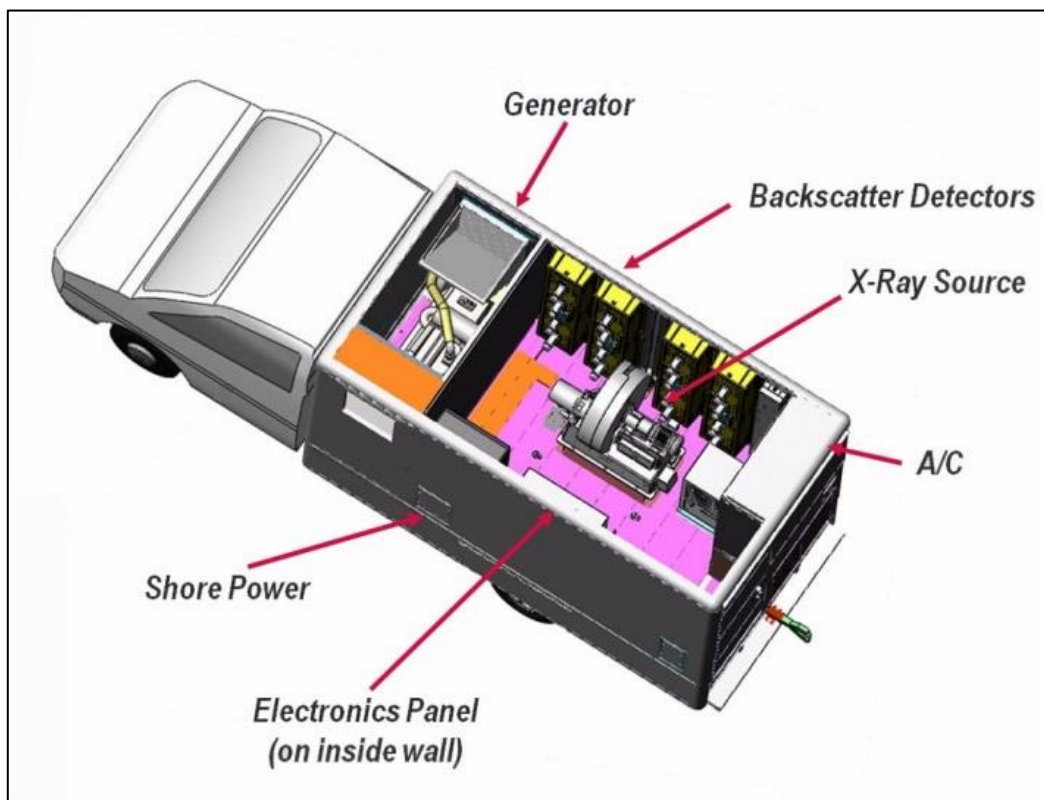
Inzwischen wird diese Technik in den USA sogar mobil zur Durchleuchtung von Fahrzeugen (Autos, LKWs) und Containern verwendet. Die Röntgenanlage befindet sich dann komplett mit Detektoren und Energieversorgung in einem Transporter. Wenn dieser mit langsamem Tempo

an verdächtigen Fahrzeugen oder Containern vorbeifährt, kann das Innere dieser Objekte durch die Backscattermethode abgebildet werden. Diese Backscatter-Vans wurden einst erfolgreich im Irakkrieg verwendet, um nach versteckten Waffen zu suchen. Später kamen sie in Afghanistan auf der Suche nach Sprengfallen zum Einsatz oder an Grenzübergängen zum Aufspüren von illegalen Personen. Aber auch im Inland (USA) werden sie inzwischen verstärkt zur Terrorabwehr eingesetzt. Kritik kommt vor allem von Bürgerrechtsorganisationen, die vermuten, dass die Röntgenautos unkontrolliert im zivilen Bereich eingesetzt werden, durch Hauswände, Fahrzeuge und Kleidung schauen und die Persönlichkeitsrechte der Bürger massiv verletzen - ganz abgesehen von den gesundheitsschädlichen Aspekten solcher Röntgenabtastung. In Deutschland sind solche mobilen Anlagen nicht erlaubt.

Die folgenden Bilder zeigen, wie leistungstak diese Technik inzwischen ist und wie berechtigt die Forderungen nach Regeln sind, die den Einsatz der Backscatter-Vans legitimieren sollen.



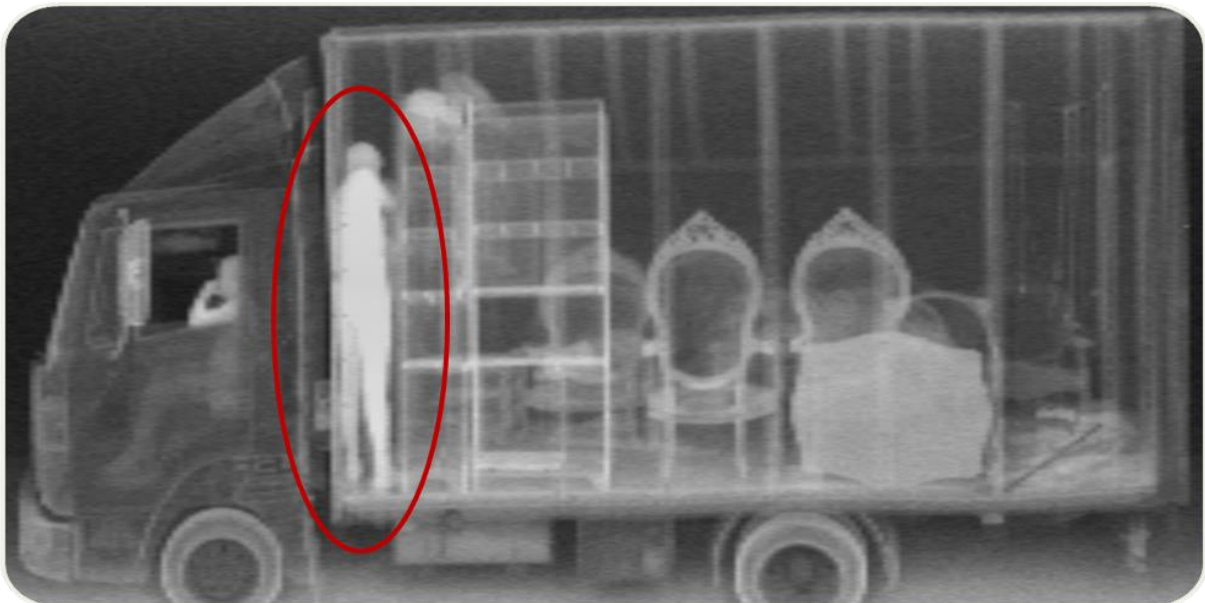
Rapiscan Systems



Rapiscan Systems



Rapiscan Systems

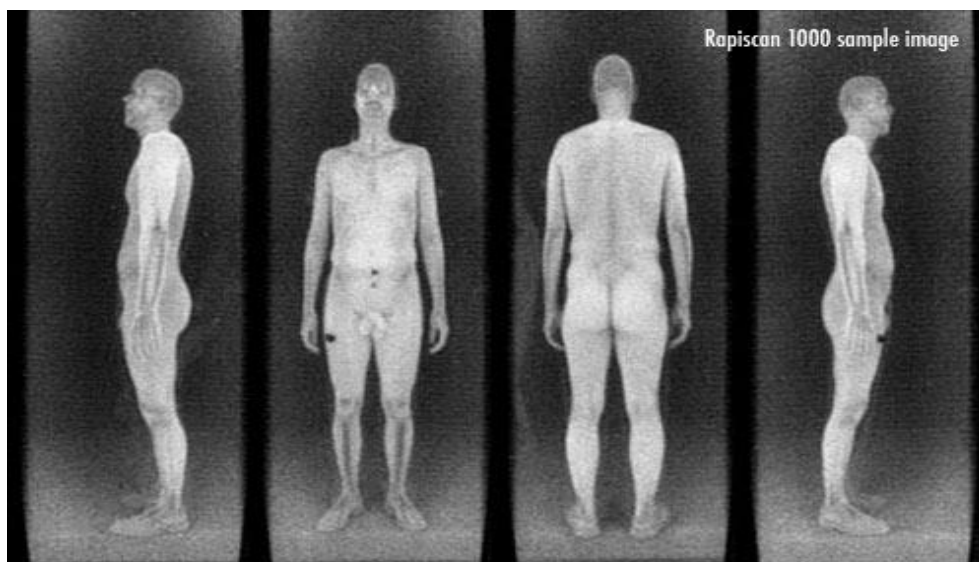


Rapiscan Systems



Rapiscan Systems

Auch für Körperscanner werden Backscatter-Systeme inzwischen auf amerikanischen Flughäfen eingesetzt. Obwohl die Strahlenbelastung für die gescannte Person in der Regel sehr gering ausfällt, ist der Nutzen dieser Technik sehr umstritten und das folgende Bild macht deutlich, wie stark in die Intimsphäre von Menschen eingegriffen wird. Körperscanner, die mithilfe von Röntgenstrahlung funktionieren, sind in Deutschland nicht zugelassen. Als Grund wird unter anderem auch angeführt, dass die Strahlendosis von unter einem Mikrosievert zwar sehr gering ist, diese sich aber nicht im gesamten Körper verteile, sondern vornehmlich auf die Haut wirke. Dort fallen die Belastungen dann vergleichsweise hoch aus, was das Risiko für Hautkrebs ansteigen lässt.



Rapiscan Systems