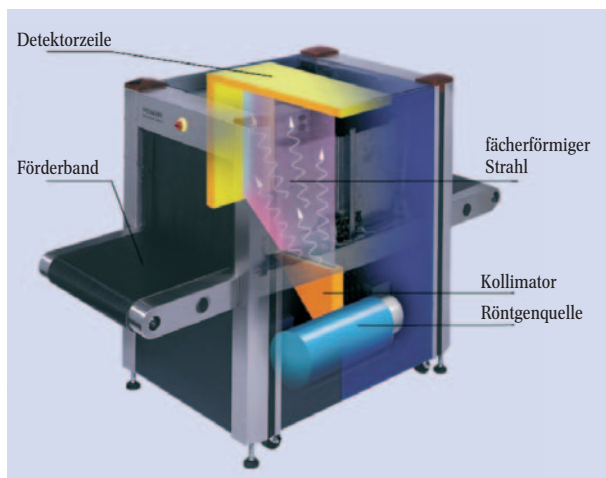


## Röntgenblick für die Sicherheit

*Nicht erst seit dem 11. September 2001 ist die Flugsicherheit ein drängendes Thema. Seit längerem sucht man wirksame Mechanismen, Gepäck effektiv und schnell nach Waffen zu durchsuchen. Dabei hat sich die Durchleuchtung mit Röntgenstrahlung als Standardmethode etabliert. Metallteile von Waffen sind damit recht einfach zu entdecken, viel schwieriger ist die Suche nach Plastiksprengstoffen, die sich in jede beliebige Form kneten lassen.*

Ein Gegenstand lässt sich mithilfe von Röntgenstrahlen prinzipiell auf zweierlei Arten abbilden, die sich durch den physikalischen Prozess der Bildentstehung unterscheiden. Die Transmissionstechnik basiert darauf, dass Röntgenstrahlen im Gegenstand absorbiert werden. Dichte, Dicke und Material des

1) Medizinische Röntgenbilder sind übrigens Negativbilder; die Knochen erscheinen weiß und nicht schwarz.



**Abb. 1:** Schema eines Gerätes zur Gepäckdurchleuchtung (alle Bilder: Smiths Heimann GmbH, Wiesbaden)

Objekts legen fest, wie groß der Anteil der durchgelassenen Strahlung ist. Dieser Teil produziert ein Schattenbild: An den Stellen, an denen im Extremfall die gesamte Röntgenstrahlung absorbiert wird, das Bild also dunkel bleibt, ist der Gegenstand am massivsten. Hellere Stellen verraten eine entsprechend geringere Absorption. Dabei können auch mehrere hintereinander liegende Objekte abgebildet werden (vorausgesetzt, das erste schluckt nicht schon die ganze Strahlung), wie man das auch von Röntgenaufnahmen beim Arzt kennt.<sup>1)</sup>

Die Transmissionstechnik arbeitet nach dem so genannte Scanning-Verfahren (Abb. 1), wobei ein Kollimator den von einer punktförmigen Röntgenquelle ausgehenden Strahl fächerförmig ausschneidet, der dann beispielsweise den Koffer durchdringt und auf eine linien-

förmige Detektorzeile trifft, deren einzelne „Pixel“ (Szintillationsdetektoren von einigen Quadratmillimetern Größe) zu einem Zeitpunkt einen kompletten Schnitt durch das Objekt aufnehmen. Der Koffer wird also beim Durchfahren der Prüfanlage zeilenweise abgescannt; das gesamte Transmissionsbild setzt sich aus der Summe dieser Zeilen zusammen.

### Spektraler Fingerabdruck

Die Transmissionstechnik ignoriert all die Röntgenstrahlen, die den Detektor nicht erreichen. Hier setzt der zweite Grundtyp der Bild-erzeugung via Röntgenstrahlung ein, die Streutechnik (auch Diffraktionstechnik genannt). Ein Teil der einfallenden Röntgenstrahlen wird nämlich elastisch gestreut und ver-rät mit seinem Beugungsspektrum nicht nur etwas über die Größe, sondern auch über das Material des Gegenstandes. Die Streuung findet jedoch überwiegend an der Oberfläche eines Gegenstands statt, man kann damit also nicht tief in das Objekt hineinschauen. Im Gegensatz zur Transmissionstechnik kann das Streuverfahren keinen aufgefächerten Strahl benutzen, denn dann könnte man nicht mehr auflösen, welcher gestreute Strahl von welchem Punkt des Gegenstandes stammt, da die gestreuten Strahlen miteinander interferieren; jeder Detektor „sieht“ Strahlen, die aus verschiedenen Richtungen kommen. Das bedeutet, dass mit der Streumethode das Objekt nicht Zeile für Zeile abgetastet, sondern nur in einem kleinen Bereich spektroskopiert werden kann, was aufwändiger ist und länger dauert.

Der große Vorteil des Streuverfahrens besteht darin, dass es auch die Energie der gestreuten Strahlen misst und dadurch eine genaue Materialbestimmung ermöglicht; jedes Beugungsspektrum ist quasi ein Fingerabdruck des untersuchten Stoffes.

Transmissionsbilder sagen hingegen nur etwas über den Grad der Absorption aus und zunächst einmal nichts über die

Art des Materials. Zwei Stoffe, die das gleiche Absorptionsvermögen haben, hinterlassen auch das gleiche Bild. Um mehr zu erfahren, kommt jedoch die Physik zur Hilfe. Die Strahlung aus der Röntgenröhre ist nicht monoenergetisch, sondern umfasst ein Spektrum von etwa 30 keV (noch niedrigere Energien werden ausgefiltert) bis typischerweise 140 keV. Innerhalb dieses Spektrums konkurrieren verschiedene physikalische Mechanismen um die Absorption der Röntgenstrahlung. Beim Photoeffekt wird das Gammaquant durch die innere Elektronenhülle eines Atoms vollständig absorbiert. Für kleine Energien, etwa unter 100 keV, bestimmt er in erster Linie die Gesamtschwächung der Röntgenstrahlung. Der Photoeffekt ist sehr empfindlich auf die Kernladungszahl der beteiligten Atome; sein Absorptionskoeffizient ist proportional zu  $Z^5$ . Mit anderen Worten: Blei ( $Z=82$ ) absorbiert niederenergetische Röntgenstrahlung etwa 10000-mal so stark wie Aluminium ( $Z=13$ ) und fast 500000-mal so stark wie Kohlenstoff ( $Z=6$ ). Anders hingegen bei mittleren Energien größer als 100 keV: Jetzt dominiert der Compton-Effekt, also die inelastische Photonstreuung an einem Elektron, die Absorption der Röntgenstrahlung. Sein Absorptionskoeffizient steigt nur noch linear mit der Kernladungszahl des Absorbers an, Materialunterschiede treten also viel weniger ausgeprägt zutage. Bei Energien des Röntgenquants über 1,022 MeV (also der doppelten Elektronenmasse), trägt zusätzlich die Paarbildung zur Absorption bei; diese Energie wird bei der Gepäckkontrolle jedoch nicht verwendet. Doch auch mit Photo- und Compton-Effekt allein lässt sich aus den gemessenen Intensitäts-



**Abb. 2:** Mit Röntgenstrahlen lassen sich die unterschiedlichsten Gegenstände in Koffern erkennen und analysieren.

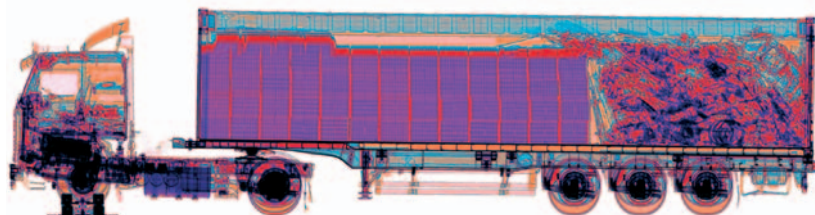
Dr. Ulrich Kilian,  
science & more  
redaktionsbüro,  
uk@science-and-  
more.de

ten ein Rückschluss auf die Kernladungszahl und damit das absorbierende Material ziehen, wenn zwei Röntgenquellen unterschiedlicher Energie benutzt werden oder – was geschickter ist – eine Quelle, aber zwei unterschiedlich dicke Detektoren, von denen der dünnere nur auf die niederenergetische Strahlung (die hauptsächlich vom Photoeffekt absorbiert wurde) anspricht und die höherenergetische Strahlung für seinen dicken „Kollegen“ durchlässt. Letzterer misst dann vor allem Absorption durch den Compton-Effekt. Das Verhältnis beider Messungen liefert einen Hinweis auf  $Z$  und damit das Material, und zwar unabhängig von dessen Dicke. Jede Kernladungszahl  $Z$  hat also eine

jeweils verschiedenen Elementbereichen entsprechen: organische Materialien, aus denen Sprengstoffe bestehen ( $0 < Z < 10$ ), Elemente mit mittlerer Atomzahl ( $10 < Z < 18$ ) sowie schwere Elemente, z. B. Eisen. Die kontinuierliche Skala hat den Vorteil, dass überlappende Materialien nicht dem falschen Bereich zugeschlagen werden, also ein Sprengstoff mit einer dünnen Stahlschicht nicht als unbedenkliches Metall durchgeht.

### Schnelle Durchleuchtung

Moderne automatische Prüf- anlagen für Reisegepäck setzen sowohl die Transmissions- als auch die Streutechnik ein und arbeiten in mehreren Stufen. In der ersten



**Abb. 3:** Mit Röntgendurchleuchtung lassen sich die fast 4 Millionen Zigaretten entdecken, die sich hinter einer Tarnladung befinden und die ein Zollfahnder evtl. nicht entdeckt hätte.

bestimmte eindeutige Messsignatur. Verknüpft man diese Signaturen nun mit einer Farbtabelle, erhält man Transmissionsbilder, deren Farben verschiedene Materialien repräsentieren und deren Helligkeiten etwas über die Materialdicke aussagen (Abb. 2). In der Praxis hat es sich als sehr nützlich erwiesen, die kontinuierliche Farbskala in drei Bereiche zu unterteilen, die

Stufe werden mithilfe der Transmissionstechnik, die einen Durchsatz von bis zu 1500 Koffern pro Stunde erlaubt, anhand der  $Z$ -Einordnung die potenziellen Bösewichte aussortiert, etwa wenn bei der Aufnahme organisches Material, das auf Sprengstoff hindeutet, entdeckt wurde. Diese Koffer werden über eine Abzweigung des Förderbandes der zweiten Stufe zugeführt,

die sich die kritischen Stellen im Koffer mittels Röntgenstreuung genauer ansieht und die gewonnenen Beugungsspektren mit den in einer Datenbank abgelegten Mustern der bekannten Sprengstoffe vergleicht. Sollten Koffer auch die zweite Stufe nicht mit Erfolg passieren, werden sie manuell eingehender untersucht; sollte sich der kritische Inhalt lediglich als Schokolade oder dergleichen entpuppen, wandert der Koffer zu den unkritischen Gepäckstücken zurück. Dieses System hat sich in der Praxis als sehr zuverlässig erwiesen und ist auch so schnell, dass es den hektischen *Check In* nicht stört.

Zukünftige Entwicklungen zielen vor allem darauf ab, die Technologien der zweiten Stufe zu verbessern. In den USA werden für die genaue Untersuchung beispielsweise auch Computertomographen, wie man sie aus der Medizin kennt, verwendet. Alternativen zu Röntgengeräten sind aber auch vorstellbar, etwa Verfahren, die die Kern-Quadrupol-Resonanz nutzen, also den Nachweis der Präzessionsbewegung eines Kern-Quadrupolmoments durch Resonanz mit einem äußeren magnetischen Wechselfeld.

Übrigens lassen sich nicht nur Koffer durchleuchten, sondern auch ganze LKWs (Abb. 3), beispielsweise am Hamburger Hafen. Schmuggler müssen sich also schon mehr einfallen lassen, als ihre heiße Ware einfach nur hinter einer harmlosen Tarnladung zu verstecken.

ULRICH KILIAN