

Thema:

**Unterstützung von Landminendetektion durch  
Bildauswertungsverfahren und Robotereinsatz**

**Bildgewinnung durch Röntgenverfahren**

**Ausarbeitung**

im Fachgebiet Informatik  
am Institut für Informatik

Themensteller: Dipl.-Inform. Steffen Wachenfeld

vorgelegt von: Marcel Shirvanian

Abgabetermin: 2004-01-05

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	II
Abbildungsverzeichnis .....	III
Abkürzungsverzeichnis .....	IV
Symbolverzeichnis.....	V
1 Hintergrund.....	1
2 Allgemeines Röntgenverfahren .....	2
3 Röntgenrückstreutechnik .....	4
3.1 Geschichte der Röntgenrückstreutechnik .....	4
3.2 Interaktion von Röntgenstrahlung und Materie.....	5
3.3 Ausprägungen des Compton-Effektes .....	10
3.4 Geometrische Anordnung des Röntgengerätes.....	12
3.5 Quelle und Detektor.....	13
3.5.1 Gammaquelle .....	13
3.5.2 Röntgenquelle.....	15
3.5.3 Detektor.....	15
3.6 Bildgewinnung.....	16
3.7 Vor- und Nachteile .....	17
4 Alternativen und Ergänzungen zur Röntgenrückstreutechnik .....	19
4.1 Lateral Migration Radiography (LMR).....	19
4.2 Kombination aus Röntgenrückstreutechnik und Wasserdüsensystem .....	20
4.3 Minendetektion durch klassisches Röntgenverfahren .....	20
5 Praktische Resultate .....	21
5.1 Klassifizierung von Minen .....	21
5.2 YXLON .....	21
5.3 University of Florida.....	23
6 Zusammenfassung und Ausblick.....	27
Literaturverzeichnis.....	28

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 2.1:</b> Röntgenröhre .....	2
<b>Abb. 2.2:</b> Bohr'sches Atommodell .....	3
<b>Abb. 3.1:</b> Zusammenhang von Photonenenergie und Streuwinkel .....	7
<b>Abb. 3.2:</b> Ausprägungen des differentiellen Wirkungsquerschnitts .....	7
<b>Abb. 3.3:</b> Diagramm zur Dominanz der Röntgeneffekte .....	8
<b>Abb. 3.4:</b> Detektierte Photonen bei Versuchen mit Aluminium und Graphit .....	10
<b>Abb. 3.5:</b> Geometrische Anordnungen von Quelle und Detektor .....	12
<b>Abb. 4.1:</b> Aufbau des Minensuchgeräts der University of Florida .....	19
<b>Abb. 5.1:</b> Scannerprototyp ComScan450 auf einem mobilen Anhänger .....	22
<b>Abb. 5.2:</b> Trägerarm für praktischen Einsatz des ComScan450 .....	22
<b>Abb. 5.3:</b> Aufnahmen einer Antipersonen- und einer Antipanzermine .....	23
<b>Abb. 5.4:</b> X-Ray Mine Imaging System .....	23
<b>Abb. 5.5:</b> Im Labor erstellte Bilder einer TMA-4 Antipanzermine .....	24
<b>Abb. 5.6:</b> Im Labor erstellte Bilder einer TS/50 Antipersonenmine .....	24
<b>Abb. 5.7:</b> Auf dem Feld erstellte Bilder einer TS/50 Antipersonenmine .....	25
<b>Abb. 5.8:</b> Auf dem Feld erstellte Bilder einer TS/50 Antipersonenmine .....	25

## Abkürzungsverzeichnis

ICBL	International Campaign to Ban Landmines
MeV	Megaelektronenvolt
USAMERDC	U.S. Army Mobility Equipment Research and Development Center
LMR	Lateral Migration Radiography
BWB	Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung
Cs	Cäsium
Am	Americium
Cd	Cadmium
Co	Kobalt
Kr	Krypton
NaJ	Natriumjodid
Tl	Thallium
LP	Linienpaar
XMIS	X-Ray Mine Imaging System

## Symbolverzeichnis

E	Energie
$\lambda$	Wellenlänge
Å	Angström
m	Masse
c	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
$\Theta$	Streuungswinkel des Photons
$\alpha$	$E/m_e c^2$
$m_e$	Ruhemasse des Elektrons
$\sigma_c$	Wirkungsquerschnitt des Compton-Effektes
$\Omega$	Raumwinkel
$r_0$	Klassischer Elektronenradius
$\varphi$	Anzahl an Photonen pro Zeit und Fläche (Intensität)
$\mu$	Schwächungskoeffizient
d	Dicke des Prüfobjektes
h	Abstand zum Boden
q	Abstand zwischen Quelle und Detektor

## **1 Hintergrund**

Landminen sind international ein aktuelles und brisantes Thema, da sie nach einer Studie der „International Campaign to Ban Landmines“ (ICBL) jedes Jahr 15.000 – 20.000 Menschen in über 90 Ländern verletzen oder sogar töten. Laut dem Verteidigungsministerium der USA existierten im Jahr 2001 etwa 45 – 50 Millionen Minen, die noch nicht entdeckt worden sind.

Landminen sind schon ab \$ 3 herzustellen, weshalb der Preis kein großes Hindernis für die Verbreitung ist. Allerdings ist es aufwendig und kostenintensiv, Minen aufzuspüren, weil sie zum Großteil im Boden vergraben oder durch Vegetation verdeckt sind.

Es gibt zur Zeit kaum geeignete Verfahren zur effektiven Erkennung von Minen. Eine gute Methode zur Minensuche bedeutet, dass in vorgegebener Zeit eine hohe Erkennungsrate bei einer möglichst geringen Falschalarmrate realisiert wird. Es sind Verfahren erwünscht, die unabhängig von Bodenarten, Umwelteinflüssen und Witterungsverhältnissen funktionieren, da weltweit sehr viele unterschiedliche Bedingungen herrschen. Weiterhin können auf Grund von Plastikminen und weiteren Alternativen zu Metall auch keine Materialeigenschaften der Mine – außer Sprengstoff – vorausgesetzt werden. Da die Sicherheit für Ausrüstung und Benutzer bei der Minensuche gewährleistet sein muss, darf das System keinen Kontakt zum Boden haben. Für eine eindeutige Identifikation und Entschärfung ist sicherzustellen, dass ein Bild generiert wird, mit dessen Hilfe Minen als Kampfmittel identifiziert und ihre Aufenthaltsorte präzise bestimmt werden können.

Ziel dieser Ausarbeitung ist es, für die Minensuche relevante Röntgenverfahren zu untersuchen, indem betrachtet wird, wie sie funktionieren, welche Vor- und Nachteile sich damit ergeben und in welchem Maße sie geeignet sind, in der Praxis effizient Bilder zu erzeugen, mit denen die Beseitigung von Landminen unterstützt werden kann. Dafür wird im Folgenden auf z.T. illustrative Ergebnisse zurückgegriffen, die in Laboratorien oder in Testgebieten erstellt wurden.

## 2 Allgemeines Röntgenverfahren

Die Röntgenstrahlung wurde 1895 von Wilhelm Conrad Röntgen bei Untersuchungen mit Gasentladungsröhren entdeckt und von ihm wegen ihrer Unbekanntheit zunächst X-Strahlung genannt. Anfangs wurde sie fast ausschließlich zu medizinischen Zwecken eingesetzt, wie z.B. für das Auffinden von Knochenbrüchen oder für die Mammographie<sup>1</sup>, aber im Laufe der Zeit entstand eine vermehrte industrielle Nutzung. Mittels Röntgenstrahlung ist es möglich geworden, innere Strukturen hergestellter Objekte zu überprüfen, ohne diese zerstören zu müssen.

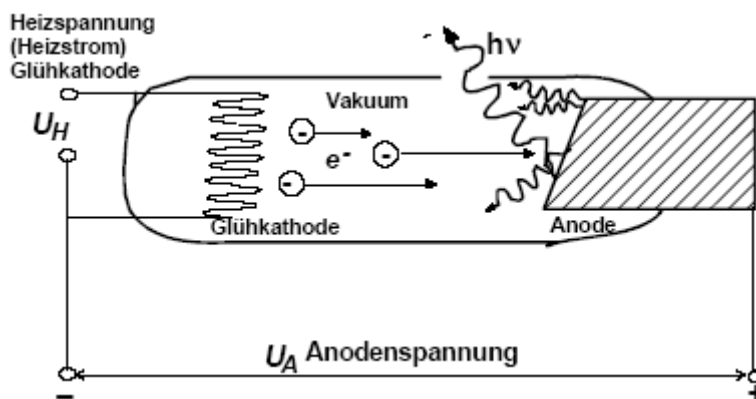


Abb. 2.1: Röntgenröhre<sup>2</sup>

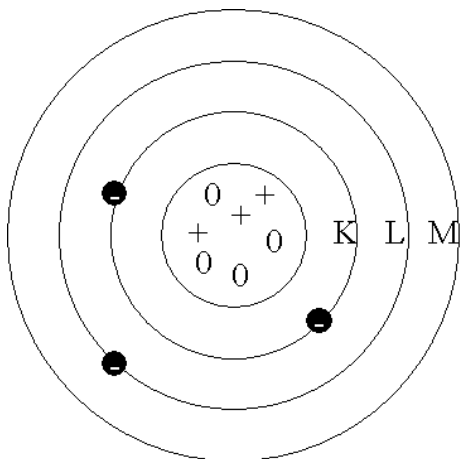
Röntgenstrahlen werden durch ihre Energie  $E$  in Megaelektronenvolt (MeV) oder ihre Wellenlänge  $\lambda$  in Angström ( $\text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ) charakterisiert, die antiproportional zueinander sind. Röntgenstrahlung entsteht allgemein in einer hochevakuierten Vakuumröhre, die in der Abbildung 2.1 dargestellt ist. Nach dem Anlegen von Spannung treten aus der dort installierten Glühkathode Elektronen aus, die in einem elektromagnetischen Feld beschleunigt werden, um schließlich auf die Anode<sup>3</sup> zu treffen. Beim Auftreffen der Elektronen entsteht 99% Wärmeenergie und 1% Röntgenstrahlung.

In den folgenden Erläuterungen wird das Bohr'sche Atommodell mit einbezogen, welches in der Abbildung 2.2 zu sehen ist. Das Modell enthält in der Mitte einen Atomkern, in welchem sich Protonen und Neutronen befinden. Die Anzahl der Protonen bestimmt die Ordnungszahl und damit das Element, wohingegen die Neutronenanzahl das Isotop eines Elementes bestimmt. Der Atomkern ist von Schalen umgeben, auf denen sich insgesamt eine Anzahl an Elektronen befindet, die der Ordnungszahl des Elements entspricht. Die Energie der Elektronen ist abhängig von der Schale, auf der sie sich befinden; sie nimmt von innen nach außen zu.

<sup>1</sup> Röntgenuntersuchung der weiblichen Brust für das Erkennen von Brustkrebs

<sup>2</sup> Quelle: Universität Erlangen (2002), S. 11

<sup>3</sup> Kathode und Anode bezeichnen die negative bzw. positive Elektrode einer elektrischen Entladung



**Abb. 2.2:** Bohr'sches Atommodell

Beim Auftreffen eines Elektrons auf ein Atom der Anode gibt es zwei Möglichkeiten, wie Röntgenstrahlung entstehen kann.

1. Wenn ein auftreffendes Elektron stark abgebremst wird, entsteht die sogenannte **Bremsstrahlung**. Dabei gelangt das Elektron zwischen den Atomkern und die inneren Schalen eines Atoms der Materie, wo es abgelenkt wird und einen Teil seiner Energie in Form von Strahlung abgibt. Es ist wahrscheinlich, dass das abgebremste Elektron mehrmals abgelenkt wird, bis es zur Ruhe kommt. Deshalb werden bei diesem Prozess auch Röntgenstrahlen mit unterschiedlichen Wellenlängen erzeugt, deren Verteilung statistischen Gesetzen unterliegt.
2. **Charakteristische Strahlung** entsteht, indem ein auftreffendes Elektron ein Elektron einer inneren Schale aus seinem Atom herausschlägt. Dazu muss die Energie des auftreffenden Elektrons größer sein als die Bindungsenergie des anderen Elektrons zum Atom. Wenn anschließend das austretende Elektron durch ein Elektron einer äußeren Schale ersetzt wird, entsteht Strahlungsenergie in Höhe der Energiedifferenz der beiden Schalen. Analog zur Bremsstrahlung entsteht hierbei Röntgenstrahlung mit unterschiedlicher Wellenlänge, da verschiedene Übergänge möglich sind. Bei einer Substitution des austretenden Elektrons durch ein freies Elektron entsteht keine Röntgenstrahlung.

Gewöhnlich wird Röntgenstrahlung in der Medizin angewendet, um damit innere Anomalien zu erkennen. Dies ist möglich, da Röntgenstrahlung die Eigenschaft hat, je nach Dichte und Ordnungszahl des Materials unterschiedlich stark absorbiert zu werden. In der Medizin wird ein Film hinter einem Patienten aufgebaut, auf dem verschiedene Helligkeitsmuster erscheinen, die abhängig davon sind, ob Knochen oder Gewebe bestrahlt wurde. Bei der Minensuche muss eine andere Methode angewendet werden, weil kein Film hinter die Minen gelegt werden kann, da diese im Boden vergraben sind.



### 3 Röntgenrückstreutechnik<sup>4</sup>

Es wird ein Verfahren gesucht, das verdeckte Kampfmittel aufspürt, ohne zu wissen, an welcher Stelle sie sich befinden. Die Röntgenrückstreutechnik ermöglicht dies, wobei eine Röntgenquelle auf den Boden ausgerichtet und die Anzahl der zurückgestreuten Photonen registriert wird. Im Folgenden wird diese Methode näher beschrieben.

Die Rückstreutechnik funktioniert auch mit Gammastrahlen, deren Unterschiede zu Röntgenstrahlen hauptsächlich in der Erzeugung<sup>5</sup> und in einer kürzeren Wellenlänge, bzw. höheren Energie liegen. Die Erläuterungen in den folgenden Abschnitten gelten nicht ausschließlich für Röntgen-, sondern i.d.R. auch für Gammastrahlung, die für die Rückstreutechnik bestimmte Vor- und Nachteile gegenüber der Röntgenstrahlung hat, welche später noch aufgezeigt werden.

#### 3.1 Geschichte der Röntgenrückstreutechnik

Die erste Veröffentlichung zur Röntgenrückstreutechnik wurde 1956 von Odeblad und Norhagen<sup>6</sup> erstellt, in der beschrieben wird, wie sich mittels zurückgestreuter Röntgen- und Gammastrahlen verdeckte Objekte entdecken lassen. Es wurde nachgewiesen, dass Unterschiede bei der Rückstreuung zu erkennen sind, je nachdem welches Material bestrahlt wird. Der Grund dafür ist, dass die Rückstreuung bei verschiedener Dichte und Ordnungszahl der Materialien unterschiedlich stark ausgeprägt ist.

1967 haben die Verantwortlichen der Texas Nuclear Corporation die Idee aufgegriffen, um damit nach Minen zu suchen, weil die Elemente von Böden andere Ordnungszahlen als die Elemente von Sprengstoff haben. Deshalb wurde nach einer Möglichkeit gesucht, um diese Unterschiede zu messen und einen Minendetektor zu konstruieren.

Am 26.2.1968 hat das U.S. Army Mobility Equipment Research and Development Center (USAMERDC) festgelegt, den Vorschlag der Texas Nuclear Corporation finanziell zu unterstützen. Die Verträge dauerten bis Juni 1973, als das Projekt eingestellt wurde, weil die Erfolge aus praktischer militärischer Sicht nicht ausreichend genug waren.

1986 haben Mitarbeiter des USAMERDC die aufgetretenen Schwierigkeiten der University of Florida geschildert, die daraufhin eine neue Methode erforscht hat, die eben-

---

<sup>4</sup> Im Englischen heißt diese Technik „Compton Backscatter Imaging“, weil das Verfahren sowohl mit Röntgen- als auch mit Gammaquellen funktioniert.

<sup>5</sup> Gammastrahlen werden emittiert, wenn bei einem radioaktiven Zerfall ein Atomkern von einem höheren zu einem niedrigeren Energiezustand übergeht.

<sup>6</sup> Odeblad, E.; Norhagen, A.: “Electron Density in a Localized Volume by Compton Scattering”, Acta Radiologica, No. 45, 1956, S. 161 - 167

falls auf dem Prinzip der Rückstreuung basiert und als Lateral Migration Radiography<sup>7</sup> (LMR) bezeichnet wird. In den späteren Kapiteln wird diese Technik intensiver betrachtet.

In Deutschland hat das Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung (BWB) einen Kooperationsvertrag mit der Firma YXLON International X-Ray GmbH, einer ehemaligen Tochtergesellschaft von Philips, geschlossen. Grundlage dieses Vertrages war die Erforschung der Röntgenrückstreutechnik sowie die Herstellung eines darauf basierenden Minendetektors. In den späten 90er Jahren hat YXLON dann das weltweit erste kommerzielle Röntgengerät auf den Markt gebracht, mit dem sich Abbildungen von verdeckten Objekten ermöglichen lassen.

### 3.2 Interaktion von Röntgenstrahlung und Materie

Beim Ausrichten einer Quelle auf einen Boden treffen Photonen (Elementarteilchen des Lichts) der Röntgenstrahlung auf die Atome der Materie des Bodens. Dabei gibt es vier verschiedene Prozesse, die auftreten können und nachfolgend erläutert werden.

1. Als **Rayleigh-Streuung**<sup>8</sup> wird das Ereignis bezeichnet, dass sich die Richtung der Röntgenstrahlen ändert, die Wellenlänge und damit auch die Energie jedoch unverändert bleibt. Der Vorgang wird hier aber nicht weiter betrachtet, da er hauptsächlich auftritt, wenn Photonen mit geringer Energie auf Elemente mit hohen Ordnungszahlen treffen. Diese Voraussetzung ist bei der Minendetektion nicht gegeben.
2. Wenn sich ein Photon beim Zusammenstoß mit Materie in ein Elektron und ein Positron umwandelt, so wird von **Paarbildung** gesprochen. Dieser Vorgang findet meistens in der Nähe eines Atomkerns statt und funktioniert nur, wenn das Photon eine bestimmte Mindestenergie von 1,022 MeV hat. Diese Voraussetzung beruht auf der Relativitätstheorie von Einstein, die besagt, dass die Energie eines Teilchens durch seine Masse multipliziert mit der quadratischen Lichtgeschwindigkeit ( $E = mc^2$ ) ausgedrückt werden kann. Da die Ruhemassen von Elektron und Positron bei jeweils 0,511 MeV/c<sup>2</sup> liegen, muss die besagte Mindestenergie vorhanden sein, um diese beiden Teilchen zu erzeugen. Das Elektron vereinigt sich jedoch bald wieder mit dem Positron und bildet ein sogenanntes Positronium, wodurch Vernichtungsstrahlung freigesetzt wird, die weniger E-

---

<sup>7</sup> Wörtliche Übersetzung: Seitliche Wanderung der Röntgendurchstrahlung

<sup>8</sup> Auch: elastische Streuung, klassische Streuung oder Vorwärtsstreuung

nergie als das ursprüngliche Photon besitzt, weil beim Zusammenschluss auch Wärmeenergie entsteht.

3. Von **photoelektrischer Absorption** wird gesprochen, wenn ein auf ein Atom auftreffendes Photon absorbiert wird und dabei seine Energie vollständig auf ein Elektron des Atoms überträgt. Das Elektron verliert seine Bindung zum Atom, falls die Photonenenergie höher als die Bindungsenergie des Elektrons zum Atom ist. Das Atom ist anschließend ionisiert, also positiv geladen.
  
4. Grundlage für die Röntgenrückstreutechnik bildet der **Compton-Effekt**, der stattfindet, wenn ein auf ein Atom auftreffendes Photon seine Energie auf ein schwach gebundenes Elektron, also ein Elektron einer äußeren Schale abgibt. Analog zur photoelektrischen Absorption tritt das Elektron aus dem ionisierten Atom aus, wenn die Energie des Photons höher als die Bindungsenergie des Elektrons ist. Das Photon gibt jedoch nicht seine ganze Energie ab, sondern wird mit niedrigerer Energie und damit größerer Wellenlänge in eine andere Richtung abgelenkt. Welche Energie das Photon nach der Kollision besitzt, hängt vom Streuwinkel  $\Theta$  und der Anfangsenergie  $E_0$  ab, was durch die nachfolgende Formel  $E_1 = E_0/[1 + \alpha(1 - \cos\Theta)]$  ausgedrückt ist. Dabei ist  $\alpha$  hier definiert als  $E_0/m_e c^2$  und drückt auf Grund der Relativitätstheorie die Relation von Anfangsenergie des Photons zur Energie des Elektrons aus;  $m_e$  ist die Ruhemasse eines Elektrons. Die verschiedenen Resultate der Formel sind in der Abbildung 3.1 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Energie eines austretenden Photons gleich der eines eintretenden Photons ist, falls  $\Theta = 0^\circ$  ist. Dieser Energieerhalt resultiert aus der unveränderten Flugbahn des Photons. Weiterhin lässt sich feststellen, dass mit größerem Winkel die Energie nach der Kollision weiter verringert wird. Bei einem  $180^\circ$ -Winkel stößt das Photon frontal mit dem Elektron zusammen, weshalb mehr Energie auf das Elektron übertragen wird, als wenn sich Photon und Elektron bedingt durch einen kleineren Winkel nur leicht streifen würden. Außerdem konvergiert mit zunehmender Anfangsenergie die Energie von Photonen nach einer Kollision gegen einen festen Wert, der abhängig vom Streuwinkel ist, falls  $\Theta > 0^\circ$  ist. Das heißt, dass der prozentuale Energieverlust eines Photons mit zunehmender Anfangsenergie steigt, weil dabei mehr Energie auf das Elektron übertragen wird.

Für alle oben beschriebenen Vorgänge gibt es einen Wirkungsquerschnitt, der die Wahrscheinlichkeit des Auftretens des jeweiligen Prozesses beschreibt. Im Folgenden wird nur der für diese Ausarbeitung relevante Wirkungsquerschnitt des Compton-Effekts  $\sigma_c$  betrachtet.

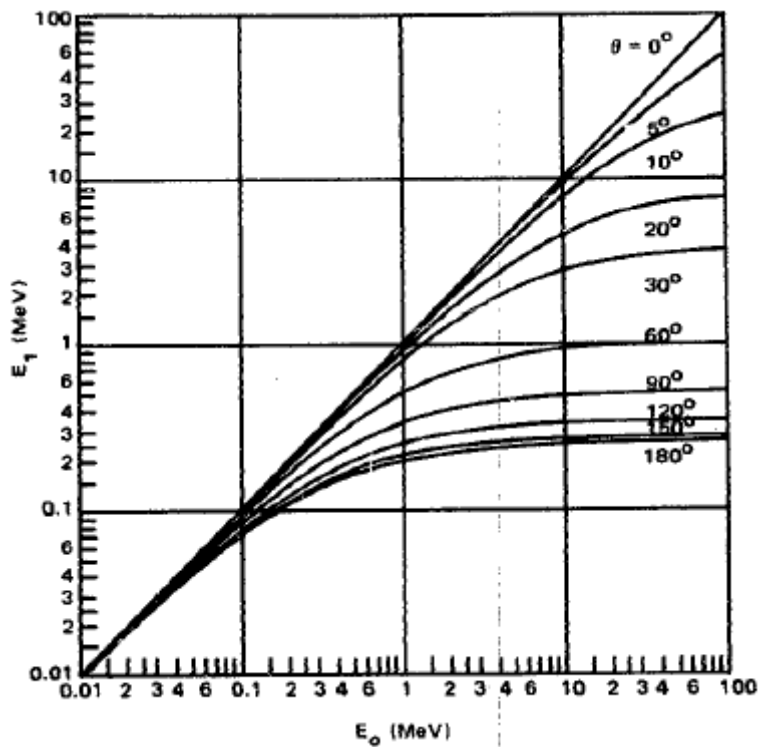


Abb. 3.1: Zusammenhang von Photonenenergie und Streuwinkel<sup>9</sup>

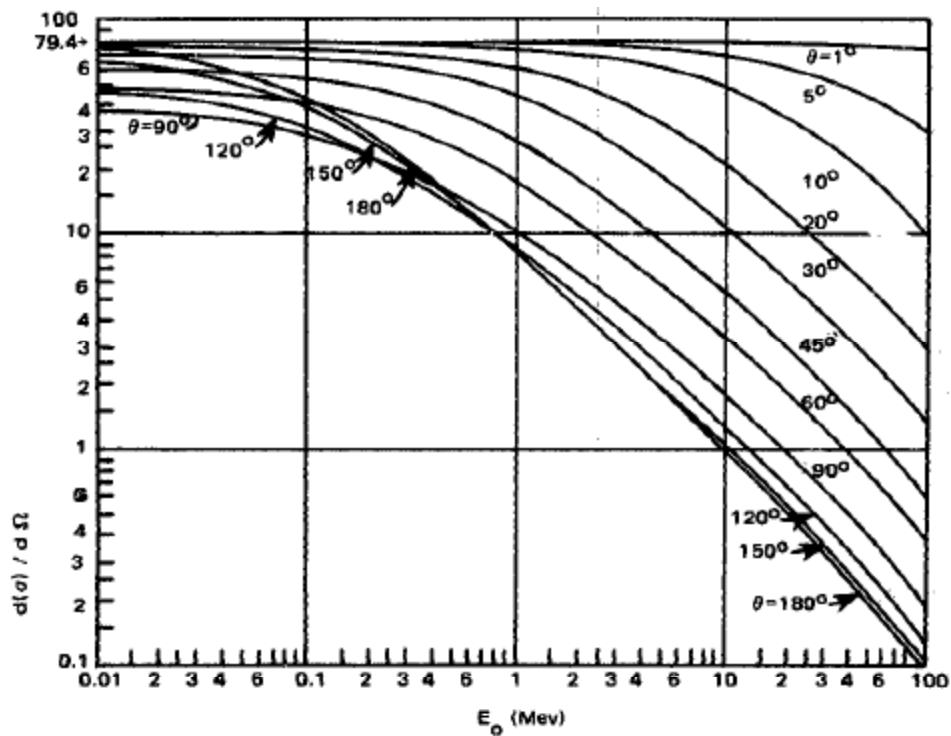


Abb. 3.2: Ausprägungen des differentiellen Wirkungsquerschnitts<sup>10</sup>

<sup>9</sup> Quelle: Roder, Van Koyenburg (1975), S. 7

<sup>10</sup> Quelle: Roder, Van Koyenburg (1975), S. 7

In der folgenden Klein-Nishina-Formel wird der differentielle Wirkungsquerschnitt  $d\sigma_c/d\Omega$  untersucht, der eine Aussage über die relative Wahrscheinlichkeit der Streuung von Photonen in einem bestimmten Winkel  $\Theta$  trifft. Dabei wird der Wirkungsquerschnitt in Bezug zum Raumwinkel<sup>11</sup>  $\Omega$  gestellt, da die Streuung in einem dreidimensionalen Raum stattfindet;  $r_0$  steht dabei für den klassischen Elektronenradius. Die Werte der Klein-Nishina-Formel lassen sich aus der Abbildung 3.2 ablesen. Es ist zu erkennen, dass die Wahrscheinlichkeit der Streuung in einem vorgegebenen Winkel mit zunehmender Anfangsenergie stark abnimmt. Weiterhin verringert sich der differentielle Wirkungsquerschnitt mit größerem Streuwinkel.

$$\frac{d\sigma_c}{d\Omega} = r_0^2 \frac{(1 + \cos^2 \Theta)}{2} \frac{1}{[1 + \alpha(1 + \cos \Theta)]} \left( 1 + \frac{\alpha^2 (1 - \cos \Theta)^2}{(1 + \cos^2 \Theta)[1 - \alpha(1 - \cos \Theta)]} \right)$$

Der Wirkungsquerschnitt des Compton-Effektes und damit die totale Wahrscheinlichkeit der Streuung ergibt sich durch Integration über alle möglichen Raumwinkel, was durch die nächste Formel ausgedrückt wird. Äquivalent zum differentiiellen Wirkungsquerschnitt nimmt  $\sigma_c$  mit höherer Anfangsenergie der Photonen ab. Da die Röntgenrückstreutechnik auf dem Compton-Effekt basiert, ist aus den beiden Formeln die Schlussfolgerung zu ziehen, dass sowohl Röntgenstrahlen mit hoher Energie als auch ein großer Streuwinkel nachteilig für die Minendetektion sind.

$$\sigma_c = 2\pi r_0^2 \left[ \frac{1 + \alpha}{\alpha^3} \left( \frac{2\alpha(1 + \alpha)}{1 + 2\alpha} - \ln(1 + 2\alpha) \right) + \frac{1}{2\alpha} \ln(1 + 2\alpha) - \frac{1 + 3\alpha}{(1 + 2\alpha)^2} \right]$$

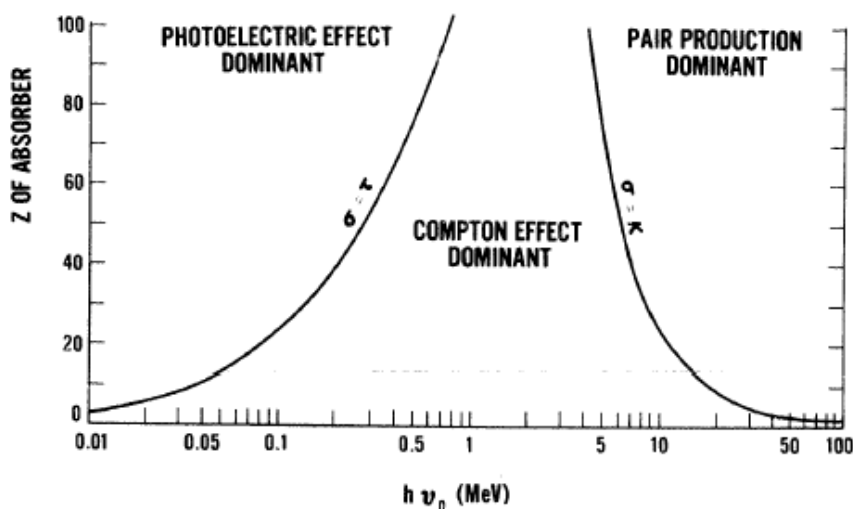


Abb. 3.3: Diagramm zur Dominanz der Röntgeneffekte<sup>12</sup>

<sup>11</sup> Ein Raumwinkel ist definiert als Relation eines Oberflächenstücks einer Kugel zum quadratischen Radius der Kugel

<sup>12</sup> Quelle: Roder, Van Koyenburg (1975), S. 2

In der Abbildung 3.3 sind die Wirkungsquerschnitte von drei der vier Effekten aufgezichnet. Dabei ist die Photonenenergie auf der Abszisse und die Ordnungszahl des bestrahlten Prüfobjektes auf der Ordinate eingetragen. Der Rayleigh-Streuung wird hier keine Beachtung geschenkt.

Die Abgrenzung der Flächen verdeutlicht den Bereich der Dominanz des jeweiligen Vorgangs. Z.B. wird im Bereich von hoher Energie und hoher Ordnungszahl der Compton-Effekt nicht vollständig unterdrückt, aber sein Auftreten ist wesentlich geringer ausgeprägt, als im Bereich von mittleren Energien und geringer Ordnungszahl. Auf den jeweiligen Linien sind die Wirkungsquerschnitte der angrenzenden Effekte gleich groß.

Wie zu sehen ist, hängen die Wirkungsquerschnitte nicht nur von der Photonenenergie, sondern auch von der Ordnungszahl des Prüfobjektes ab. Dieses Verhalten resultiert aus dem sogenannten Schwächungsgesetz, welches besagt, dass jedes Element ein bestimmtes Schwächungsverhalten für Röntgenstrahlen aufweist. Zur Erläuterung muss zuerst definiert werden, was unter dem Begriff Intensität verstanden wird. Als Intensität ist die Anzahl der Photonen pro Zeit und Fläche zu verstehen, wobei eine Unterscheidung zwischen Intensität vor und nach dem Eindringen in das Prüfobjekt stattfindet. Die Intensitätsdifferenz und damit das Schwächungsverhalten lässt sich durch die folgende Formel  $\varphi_1 = \varphi_0 * e^{-\mu d}$  ausdrücken, die einen exponentiellen Abfall der Intensität nach dem Eindringen in das Prüfobjekt  $\varphi_1$  bei steigendem Schwächungskoeffizienten  $\mu$  ( $m^{-1}$ ) und wachsender Dicke  $d$  des Prüfobjektes aufzeigt. Die Schwächung beruht auf den zuvor erläuterten Effekten, da z.B. mit zunehmender Absorption weniger Photonen aus dem Prüfobjekt austreten. Die Werte von  $\mu$  für die verschiedenen Elemente sind bis auf wenige Prozent genau bekannt.

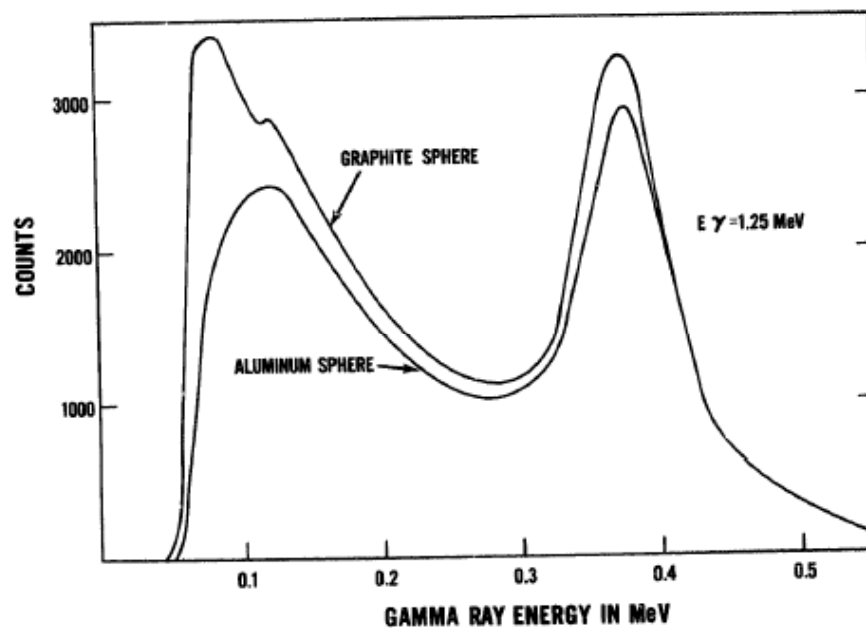
Aus der Abbildung 3.3 ist die Tatsache festzuhalten, dass der Wirkungsquerschnitt des Compton-Effekts – bedingt durch den Schwächungskoeffizienten des Schwächungsgesetzes – mit kleiner werdender Ordnungszahl des Prüfobjektes zunimmt. Böden enthalten zum Großteil die Elemente Silizium, Aluminium, Eisen und Sauerstoff, die im Durchschnitt eine Ordnungszahl von etwa 12 haben. Dagegen enthält Sprengstoff vorwiegend Elemente wie Wasserstoff, Stickstoff, Kohlenstoff und Sauerstoff mit einer durchschnittlichen Ordnungszahl von 7. Diese beiden Werte sind so niedrig, dass ein hoher Wirkungsquerschnitt des Compton-Effektes gewährleistet werden kann. Damit ist auch das Grundprinzip der Minendetektion durch die Röntgenrückstreutechnik erkennbar. Da die Elemente einer Mine geringere Ordnungszahlen als die eines Bodens haben, ist eine Unterscheidung von Mine und Boden möglich.

### 3.3 Ausprägungen des Compton-Effektes

In diesem Abschnitt wird auf den Compton-Effekt genauer eingegangen, indem mittels Versuchsauswertungen gezeigt wird, wie bestimmte Werte zu interpretieren sind, um damit verschiedene Elemente voneinander zu unterscheiden.

Detailliertere Erläuterungen zu Anordnungen von Systemen werden im nächsten Abschnitt aufgezeigt. Für die folgende Beschreibung ist aber ein bestimmtes Wissen über den Aufbau des Versuchssystems notwendig. Quelle und Detektor sind dabei jeweils von einem Kollimator umgeben. Ein Kollimator ist eine Bleilammelle, die Quelle oder Detektor umschließt und nur vorne eine Öffnung hat. Dadurch können Photonen ausschließlich in einem vorgegebenen Akzeptanzwinkel aus der Quelle austreten, weil alle anderen Photonen von der Bleischicht absorbiert werden. Entsprechend werden beim Detektor auch nur Photonen registriert, die in einem bestimmten Winkel gestreut wurden. Quelle und Detektor stehen hier im  $90^\circ$ -Winkel zueinander.

Das Ergebnis der detektierten Photonen findet sich in der Abbildung 3.4 wieder, bei der die Energie der eintreffenden Photonen auf der Abszisse und die Anzahl der registrierten Photonen auf der Ordinate steht. Ein Detektor ist also nicht nur in der Lage, die Anzahl, sondern auch die Energie der ankommenden Photonen zu messen. Der Versuch wurde sowohl mit Aluminium als auch mit Graphit als Prüfobjekt durchgeführt, weshalb für spätere Vergleichszwecke zwei Funktionen eingezeichnet sind.



**Abb. 3.4:** Detektierte Photonen bei Versuchen mit Aluminium und Graphit<sup>13</sup>

<sup>13</sup> Quelle: Roder, Van Koyenburg (1975), S. 15

Beim Versuch mit Aluminium lassen sich zwei Maxima erkennen, eines bei 110 KeV und das andere bei 360 KeV, von denen das zweite Maximum auf der Einzelstreuung beruht. Die Photonen treffen auf die Aluminiumschicht, werden einmal in einem Winkel von ungefähr  $90^\circ$  abgelenkt und gelangen ohne weitere Kollision zum Detektor, weshalb der Energieverlust so niedrig ist.

Das erste Maximum, das etwas breiter ist als das andere, ist eine Folge der Mehrfachstreuung. Wie im vorherigen Abschnitt aufgezeigt wurde, verliert ein Photon bei einer Streuung mit zunehmender Anfangsenergie prozentuell mehr Energie. Z.B. verliert ein 1,33 MeV Gammaphoton etwa 84% seiner Energie, wenn es durch einen  $180^\circ$ -Winkel gestreut wird, wohingegen ein Photon mit 50 KeV beim selben Winkel nur 16% seiner Energie verliert. Deshalb verliert ein Photon den Großteil seiner Energie bei den ersten Kollisionen, behält anschließend jedoch die meiste Energie. Die hohe Anzahl der detektierten Photonen beim ersten Maximum resultiert daher, dass Photonen registriert wurden, die unterschiedlich oft gestreut wurden, aber auf Grund ihrer niedrigen Energie vor ihrer letzten Streuung dabei nur wenig Energie verloren haben, so dass sie in einem einheitlichen Bereich liegen.

Weiterhin nimmt – wie oben bereits erwähnt – die photoelektrische Absorption mit sinkender Energie zu, wodurch die Wahrscheinlichkeit der Absorption der Photonen mit steigender Anzahl an Kollisionen zunimmt. Dadurch geht die Anzahl der detektierten Photonen mit sinkender Energie gegen 0.

Wenn bei der gleichen Versuchsanordnung Aluminium durch Graphit ersetzt wird, welches eine geringere Dichte hat, entstehen Abweichungen, die ebenfalls in der Abbildung 3.4 zu erkennen sind und im Folgenden beschrieben werden. Das Maximum der Einzelstreuung bleibt bei gleicher Energie erhalten, hat aber einen höheren Wert bei den gezählten Photonen. Die Energie bleibt konstant, weil bei einer einzigen Ablenkung die abgegebene Energie unabhängig von dem Prüfobjekt ist, aber auf Grund der geringeren Dichte von Graphit erhöht sich die Zahl der detektierten Photonen.

Das erste Maximum hat auf Grund des Dichteunterschiedes ebenfalls einen höheren Wert bei Graphit, aber zusätzlich tritt der Gipfel bei einer geringeren Energie auf, was sich anhand der Abbildung 3.3 nachvollziehen lässt. Bei einer niedrigeren Ordnungszahl setzt die Dominanz der photoelektrischen Absorption erst bei niedrigerer Photonenenergie ein. Als Folge daraus überlebt ein Photon mehr Kollisionen, bis es absorbiert oder gestreut wird, weshalb auch Photonen mit geringer Energie beim Detektor eintreffen.

Sprenghstoffe haben geringere Dichtewerte als Böden, so dass sich analoge Messwerte realisieren lassen, anhand derer eine Unterscheidung vorgenommen werden kann.



### 3.4 Geometrische Anordnung des Röntgengerätes

In diesem Abschnitt werden einige Anordnungen von Quelle und Detektor untersucht, indem die jeweiligen Eigenschaften aufgezeigt werden, woraus sich bestimmte Vor- und Nachteile ergeben. Die beiden Anordnungen, die im Folgenden erläutert werden, sind in der Abbildung 3.5 aufgezeigt.

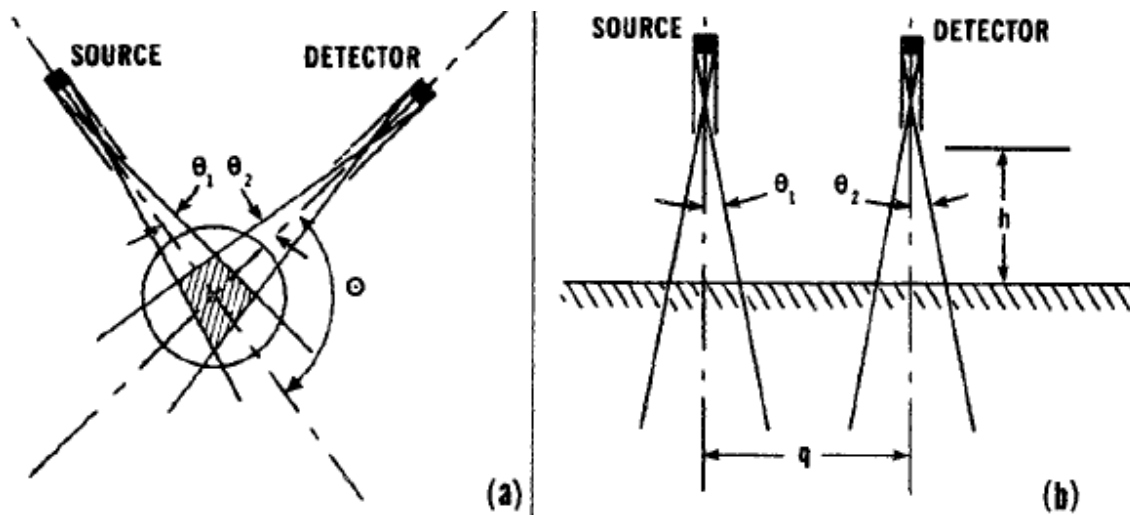


Abb. 3.5: Geometrische Anordnungen von Quelle und Detektor<sup>14</sup>

Bei der Wahl einer Geometrie gibt es prinzipiell ein entscheidendes Kriterium, nämlich ob Kollimatoren verwendet werden sollen. Die Funktionsweise eines Kollimators wurde bereits im Abschnitt 3.3 beschrieben. Durch die Vorgabe eines Akzeptanzwinkels können präzisere Messwerte erzielt werden, die zu hochwertigeren Bildern führen können. Durch Kollimatoren verringert sich jedoch die Anzahl der detektierten Photonen, weshalb Hochleistungsgeneratoren als Quelle notwendig sind, so dass Größe und Gewicht ansteigt. Gammaquellen sind nur einsetzbar, wenn kein Kollimator verwendet wird.

- a) Diese Anordnung verwendet Kollimatoren um Quelle und Detektor, die im  $90^\circ$ -Winkel zueinander ausgerichtet sind. Bei den Versuchen im vorherigen Abschnitt wurde dieser Aufbau benutzt. Die Unterscheidung von Einzel- und Mehrfachstreuung mit dieser Anordnung wurde bereits beschrieben. Vorteilhaft ist der geringe Energieverlust der detektierten Photonen, der auf Grund des kleinen Streuwinkels von etwa  $90^\circ$  möglich ist, wodurch auch schwache Energiequellen eingesetzt werden können. Ein entscheidender Nachteil ist aber die Höhenabhängigkeit der Messwerte. In der Abbildung 3.5 ist zu sehen, dass der Detektor Photonen registriert, die vom Prüfobjekt im  $90^\circ$ -Winkel abgelenkt werden. Wenn die Höhe zwischen Anordnung und Prüfobjekt vergrößert wird, ge-

<sup>14</sup> Quelle: Roder, Van Koyenburg (1975), S. 10

langen keine vom Prüfobjekt im  $90^\circ$ -Winkel gestreuten Photonen mehr zum Detektor. Es ergeben sich dadurch unterschiedliche Resultate, die auch durch die veränderte Mehrfachstreuung erzielt werden.

- b) Wie bei Geometrie (a) werden auch bei (b) Kollimatoren um Quelle und Detektor verwendet, die dazu führen, dass ausschließlich Mehrfachstreuung vom Detektor registriert wird, was in der Abbildung 3.5 ersichtlich ist. In diesem Fall sind die Messwerte unabhängig von der Höhe über dem Boden  $h$ , weil trotz Variationen von  $h$  keine Einzelstreuung beim Detektor ankommt. Dadurch wird ein Vorteil der Anordnung bei Unebenheiten im Gelände erreicht. Um diese Unabhängigkeit zu erhalten, muss aber ein möglichst großer Abstand zwischen Quelle und Detektor  $q$  gewählt werden, weil sich die in der Abbildung 3.5 ersichtlichen Strahlenkegel von Quelle und Detektor nicht kreuzen dürfen. Aber mit zunehmender Distanz  $q$  müssen Photonen einen längeren Weg zurücklegen, um vom Detektor registriert zu werden, was zu einer Verringerung der Intensität und Energie der Photonen führt.

Zusammenfassend lässt sich anhand der beiden Beispielgeometrien feststellen, dass jede Ausrichtung von Quelle und Detektor bestimmte Vor- und Nachteile mit sich bringt, so dass eine Abschätzung für die jeweiligen Anwendungsfälle bei der Minensuche vorgenommen werden muss.

### **3.5 Quelle und Detektor**

Die Basiselemente eines Minendetektors sind Quelle und Detektor, weil nur über die eingegangenen Photonen ein Bild generiert und eine Mine erkannt werden kann. Deshalb sollen diese beiden Bestandteile des Systems in diesem Abschnitt betrachtet werden, wobei sich die Quellen in Gamma- und Röntgenquellen unterscheiden lassen.

#### **3.5.1 Gammaquelle**

Gammaquellen enthalten ein instabiles Isotop<sup>15</sup>, welches beim Zerfall radioaktive Strahlung emittiert. Isotope sind Elemente mit gleicher Ordnungszahl aber unterschiedlicher Massenzahl, was bedeutet, dass die Anzahl der Protonen im Kern gleich, aber die Anzahl der Neutronen unterschiedlich ist. Die Massenzahl eines Isotops steht immer oben links von der Elementbezeichnung.

---

<sup>15</sup> In der Physik wird für Isotop auch das Synonym Nuklid verwendet.

Gammaquellen sind relativ leicht und durch den Verzicht von Kollimatoren lässt sich das Gewicht des Systems noch weiter reduzieren, so dass Geräte konstruiert werden könnten, die von einem Menschen über Minenfelder getragen werden könnten. Da aber versucht wird, Bilder zu generieren, müsste zusätzlich noch ein Rechner und weitere Ausrüstung vom Anwender getragen werden, wodurch das tragbare System zu einem theoretischen Konstrukt wird. Außerdem wäre das Strahlenrisiko für den Benutzer zu groß, weil er sich in unmittelbarer Nähe der Gammaquelle aufhalten müsste.

Wie bereits beschrieben hängt die Anzahl der Photonen, die der photoelektrischen Absorption erliegen von der Stärke der eingesetzten Quelle und von der Ordnungszahl des Prüfobjektes ab. Idealerweise sollte die Energie einer Quelle so groß sein, dass eine Dominanz des Compton-Effektes bei Minen, aber eine Dominanz der photoelektrischen Absorption bei Böden auftritt, wodurch eine drastische Unterscheidung stattfinden würde. Eine  $^{137}\text{Cs}$  Quelle mit  $E = 0,662 \text{ MeV}$  reagiert relativ unsensibel auf Änderungen der Ordnungszahl, so dass Minen vom Boden schlechter unterschieden werden können, wohingegen eine  $^{241}\text{Am}$  Quelle mit  $E = 0,06 \text{ MeV}$  zu deutlichen Differenzen bei verschiedenen Materialien führt. Daraus folgt, dass eine schwache Quelle vorteilhafter bei der Minensuche ist.

Mit abnehmender Energie der Quelle sinkt jedoch auch die Prozentzahl der zurückgestreuten Photonen, die vom Detektor aufgenommen werden. Bei freiliegenden Minen wäre das kein besonders großes Hindernis, aber die meisten Minen sind bis zu 30 cm im Boden vergraben. Da nach dem Schwächungsgesetz die Intensität mit zunehmender Tiefe der Messung exponentiell abnimmt, sollten eingesetzte Gammaquellen stark genug sein, um Messungen in ausreichender Tiefe vornehmen zu können.

Abschließend sollen nun einige praktische Beispiele für Quellen aufgeführt werden, die Photonen im gewünschten Energiebereich erzeugen. Als Gammaquellen lassen sich  $^{241}\text{Am}$  bei 60 KeV,  $^{109}\text{Cd}$  bei 88 KeV sowie  $^{57}\text{Co}$  bei 122 und 136 KeV verwenden. Die Halbwertszeiten von  $^{109}\text{Cd}$  und  $^{57}\text{Co}$  liegen jeweils bei etwa einem Jahr, so dass der radioaktive Zerfall für eine längerfristige Verwendung zu schnell geschieht.  $^{241}\text{Am}$  besitzt eine Halbwertszeit von ca. 432 Jahren, wodurch eine bessere Anwendung ermöglicht wird, das Strahlenrisiko jedoch zunimmt.

Eine Alternative zu den bisher vorgestellten Quellen ist eine gasförmige  $^{85}\text{Kr}$  Gammaquelle bei 514 KeV, bei der die Halbwertszeit fast 11 Jahre beträgt. Der große Vorteil dieser Gammaquelle zu anderen Alternativen ist das verminderte Strahlenrisiko, weil sich das Gas bei einer Beschädigung der Quelle verflüchtigen würde, anstatt den Boden zu kontaminieren.

### 3.5.2 Röntgenquelle

Der Einsatz von Röntgenröhren führt zu einem enormen Gewichtsanstieg des System, weil nur 1% der Energie des Elektronenstrahls zu Röntgenstrahlen und die restlichen Prozent zu Hitze in der Anode konvertieren. Dadurch müssen fast alle Röntgenquellen durch Luft, ein Ölbad oder andere Maßnahmen gekühlt werden. Da außerdem noch eine starke Stromversorgung benötigt wird, erhöhen sich damit Größe und Gewicht des Röntgengerätes, so dass es auf einem Fahrzeug montiert werden muss.

Trotz dieser Bedingungen für einen Einsatz von Röntgenstrahlung ergeben sich zwei große Vorteile. Einerseits kann die Quelle abgeschaltet werden, wodurch ein Strahlenrisiko vermieden werden kann, wenn die Quelle nicht in Betrieb ist. Zum anderen senden Quellen verschieden energiehaltige Photonen aus, wodurch eine unerwünschte Streuung zustande kommt. Die Varianz ist bei Röntgenquellen allerdings wesentlich geringer als bei Gammaquellen, wodurch präzisere Messungen vorgenommen werden können.

### 3.5.3 Detektor

Ein Detektor besteht standardmäßig aus einem Szintillator<sup>16</sup> und einem Photomultiplier. Im Szintillator werden normalerweise Natriumjodid-Kristalle mit eingebauten Thalliumatomen [NaJ(Tl)] verwendet, da damit Photonen im gewünschten Energiebereich problemlos erkannt werden können. Beim Auftreffen von Röntgenstrahlen senden die Kristalle UV-Strahlung aus, die zum Großteil von den Kristallen selbst absorbiert wird. Ein Teil der Strahlen trifft jedoch auf die Thalliumatome, die daraufhin blaues, sichtbares Licht emittieren. Auf Grund der vielen kleinen Lichtpulse muss als nächstes eine Verstärkung eintreten, weshalb die Lichtpulse in einen Photomultiplier weitergeleitet werden.

Im Photomultiplier trifft das sichtbare Licht auf die photointensive Schicht einer Photokathode und schlägt Elektronen proportional zur Intensität des Lichtes heraus. Diese Elektronen werden im Dynodenfeld<sup>17</sup> des Photomultipliers vervielfacht und erzeugen einen kleinen Strompuls am Ausgang. Der Puls wird daraufhin in einem Vorverstärker gefiltert und verstärkt, um schließlich in einem Zähler aufaddiert und in einem Puffer gespeichert zu werden. Mit den gewonnenen Messwerten lassen sich dann Bilder generieren, mit denen Minen erkannt werden sollen.

---

<sup>16</sup> Nach dem Auftreffen ionisierender Strahlung emittiert ein Szintillator Licht.

<sup>17</sup> Eine Dynode ist eine Elektrode, die beim Auftreffen von Elektronen, Sekundärelektronen emittiert.

### 3.6 Bildgewinnung

Aus den gewonnenen Daten kann ein Bild generiert werden, um vorliegende Minen zu erkennen. Dabei muss betont werden, dass die Röntgenrückstreutechnik kein visuelles Verfahren ist, da die Messwerte nur ein Dichteprofil widerspiegeln und erst durch Zuweisung von Helligkeitsmustern ein interpretierbares Bild entsteht. Nachfolgend wird das Verfahren der Firma YXLON beschrieben.

Bei einer Messung werden sequentiell horizontale Schichten abgetastet, indem Quelle und Detektor in einem bestimmten Winkel zueinander ausgerichtet werden. Da die Energie der detektierten Photonen bei der Einzelstreuung nur vom Streuwinkel abhängig ist, kann aus einem gemessenen Energiewert die Tiefe der Messung bestimmt werden, bei der die Ablenkung stattgefunden hat. Somit werden nur die Daten einer einzigen Tiefe gespeichert. Danach wird die Anordnung verstellt, um die nächsten Schichten abzutasten, aus denen insgesamt ein 3D-Datenobjekt berechnet wird. Um Geschwindigkeitsvorteile zu erlangen, wäre ein Mehrkanaldetektor geeignet, der mehrere Photomultiplier mit je einem eigenen Zähler und Puffer besitzt. Jeder Kanal ist dabei auf eine andere Tiefe eingestellt, so dass mit nur einer einzigen Messung verschiedene Schichten des Bodens abgetastet werden können.

Weiterhin ist eine tiefenkompensierende Methode eingebaut worden, welche die Zählrate in Abhängigkeit der Tiefe korrigiert, da selbst bei einem homogenen Boden die Anzahl der detektierten Photonen mit Anstieg der Durchdringungstiefe abnimmt. Durch die Korrektur wird einem oberen Bereich des Bodens der gleiche Grauwert wie einem unteren Bereich zugeordnet.

Die Tiefe und weitere Einstellungen der Messung können in Echtzeit modifiziert werden, so dass ein schneller Überblick über bestimmte Zonen möglich ist, wobei auch die Möglichkeit besteht, Teilbereiche zu vergrößern und Kontraste zu verstärken. Des Weiteren sind Abmessungen der gewonnenen Daten möglich, um Dimension und Lage des erkannten Objektes zu bestimmen.

Eine Verbesserung der Methode ergibt sich durch ein indirektes Bildverfahren, bei dem die einzelnen Schichtbilder wie bei einem Trickfilm aneinander gereiht werden. Die Strukturen werden im Gehirn des Betrachters zu einem 3D-Objekt zusammengefügt, das besser als ein normales Bild erkannt werden kann. Obwohl die Erkennung eines Objektes dadurch wesentlich vereinfacht wird, unterliegt die Darstellung der subjektiven Einschätzung des Betrachters, die selbstverständlich fehlerbehaftet sein kann.

Die Schichten werden als Bilder im 24 Bit RGB Modus des BMP Formates gespeichert und die Schichtfolgen in eine AVI-Datei umgewandelt. Die Größe der AVI-Datei lässt sich durch Komprimierung auf etwa 5-10% minimieren, wodurch jedoch die Qualität deutlich verschlechtert wird.

Die Bildaufzeichnung geschieht im Rasterverfahren, bei dem für die Generierung eines flächendeckenden Bildes eine Kante eines Elementes an die seines Nachbarobjektes anstoßen sollte, obwohl eine Überlappung noch vorteilhafter wäre. Da die Messzeit aber kubisch mit der eingestellten Auflösung wächst, muss eine detailliertere Darstellung begründet sein. Empfehlenswert ist es, zuerst eine grobe Auflösung zu wählen, um anschließend bei Bedarf einen kleineren Bereich mit einer feineren Auflösung darzustellen. Bei Röntgenbildern ist die Auflösung definiert als Linienpaare/mm (LP/mm), wobei ein Linienpaar immer aus einem weißen und einem schwarzen Strich besteht, die parallel zueinander liegen. Je Mehr Linienpaare auf einen Millimeter passen, desto höher und detailgetreuer ist die Auflösung, aber desto aufwendiger ist es auch, das Bild darzustellen. Es gibt zwei Möglichkeiten zur Grobrasterung, nämlich eine Änderung der Auflösung, indem die Blendenspalte vergrößert wird und eine Vergrößerung des Rasters. Die erste Methode erhöht die Flächenleistung und Intensitätsaufnahme, weil der Detektor mehr Strahlung aufnehmen kann, was aber zu einem zeitlichen Nachteil durch das Wechseln der Blenden führt. Die zweite Methode vergrößert die Schrittweite, so dass sich die Kanten der Elemente nicht mehr berühren.

### **3.7 Vor- und Nachteile**

Abschließend zur Röntgenrückstreutechnik werden noch diverse Vor- und Nachteile dieses Verfahrens aufgezeigt.

Vorteile:

- Ein Bild zur Erkennung von Minen wird erstellt, das optional mit einer Datenbank in Verbindung gebracht werden kann, um eine schnelle und korrekte Identifikation zu gewährleisten.
- Merkmale wie runde Strukturen, Hohlräume und Zünder werden erkannt, wodurch eine Mine besser identifiziert werden kann.
- Das Verfahren führt auf Grund der Bilder zu einer hohen Detektions- und einer niedrigen Falschalarmwahrscheinlichkeit.

- Die Methode funktioniert unabhängig vom Material der Mine und der Beschaffenheit des Bodens, selbst wenn er mit Wasser bedeckt ist.
- Es besteht ein hinreichender Sicherheitsabstand zum Boden, weshalb ein versehentliches Auslösen einer Mine vermieden werden kann.

Nachteile:

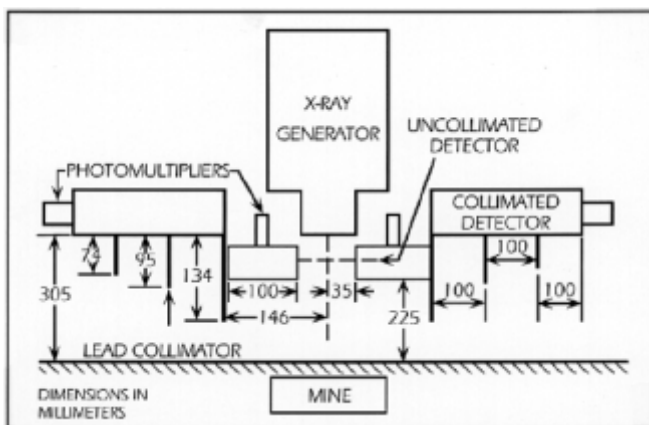
- Radioaktive Strahlen können für den Benutzer des Systems zu permanenten Schäden führen, die auch bei einem von der Bundeswehr vorgegebenen Sicherheitsabstand von einigen Metern noch auftreten können.
- Bei einer Detonation besteht die Möglichkeit, dass die Apparatur beschädigt wird, so dass eine Gefahr der Kontamination der Umgebung drohen würde.
- Die Abtastung einer bestimmten Fläche dauert bei allen bekannten Anwendungen sehr lange und wird bei kleineren Minen sogar noch erhöht, weil dabei eine hohe Auflösung erforderlich ist.
- Obwohl es unterschiedliche Aussagen zur Durchdringungstiefe gibt, die später noch aufgezeigt werden, lässt sich allgemein festhalten, dass die Röntgenrückstreutechnik bei tief vergrabenen Kampfmitteln nicht anwendbar ist.

## 4 Alternativen und Ergänzungen zur Röntgenrückstreutechnik

Es gibt noch viele weitere Möglichkeiten, Röntgenstrahlung zu nutzen, um Minen zu entdecken, die hier aber nicht ausführlich beschrieben werden. Ergänzend zum vorherigen Kapitel werden nun drei Verfahren kurz präsentiert, die auf der Röntgenstrahlung und teilweise auch auf der Röntgenrückstreutechnik basieren.

### 4.1 Lateral Migration Radiography (LMR)

Das größte Problem der Röntgenrückstreutechnik ist die Durchführung in der Praxis, weil die Methode viel Zeit in Anspruch nimmt, um Bilder zu erstellen, so dass die Anwendung damit erschwert wird. Die University of Florida hat eine neue, auf dem Compton-Effekt basierende Methode erforscht, die als Lateral Migration Radiography bezeichnet wird und deren Funktionsweise Inhalt dieses Abschnitts sein wird.



**Abb. 4.1:** Aufbau des Minensuchgeräts der University of Florida<sup>18</sup>

LMR benutzt sowohl Einzel- als auch Mehrfachstreuung, um unterschiedliche Bilder zu erzeugen, wobei zwei Arten von Detektoren eingesetzt werden, nämlich kollimierte und unkollimierte Detektoren, was in der Abbildung 4.1 zu erkennen ist. Die inneren unkollimierten Detektoren erfassen sowohl einfach als auch mehrfach gestreute Photonen, wohingegen die direkt gestreuten Photonen die äußeren Detektoren auf Grund der Bleilamellen nicht erreichen. Durch den „seitlichen“ Transport der Photonen im Boden, treffen mehrfach gestreute Strahlen bei den äußeren Detektoren ein, woraus sich auch der Name LMR ableitet. Diese Architektur wurde im Labor eingesetzt. Für Versuche auf dem Feld hat die University of Florida ein Gerät gebaut, welches als X-Ray Mine Imaging System (XMIS) bezeichnet wird und das im Gegensatz zu dem System im Labor nur einen unkollimierten Detektor zwischen den kollimierten Detektoren hat.

<sup>18</sup> Quelle: MacDonald et al. (2003), Anhang M, S.209



Es werden von den beiden Detektoren zwei Arten von Bildern erstellt, die unterschiedliche Merkmale haben. Das Bild des unkollimierten Detektors von einer Mine ist eine sehr detailgetreue Abbildung, da z.B. Strukturen und Zünder zu erkennen sind. Der Nachteil liegt in der Abstufung der Mine zum Boden, weil bedingt durch die Mehrfachstreuung das Helligkeitsmuster der Mine relativ nahe an dem des Bodens liegt. Bei der Darstellung des kollimierten Detektors sind keine Einzelheiten zu sehen, aber die Mine wird deutlich intensiver angezeigt. Durch Subtraktion des Bildes des unkollimierten Detektors von den anderen Bildern ist es möglich, eine Darstellung zu generieren, die sowohl detailgetreu ist, als auch eine deutliche Unterscheidung der Mine zum Boden aufweist. Die endgültig fertiggestellten Bilder eignen sich nicht nur ausgezeichnet zur Minendetektion, sondern auch zur Minenidentifikation, da sich der hoch ausgeprägte Detailgrad hervorragend zum Vergleich mit bekannten Minen eignet.

Auf Grund der hohen Qualität der subtrahierten Bilder lassen sich Auflösungen einstellen, mit denen die Geschwindigkeit der Abtastung deutlich erhöht werden kann. Durch die Synchronisation der einzelnen Prozesse, wie Fläche abtasten, Daten aufnehmen und auswerten sowie Bilder generieren, ergeben sich ebenfalls Geschwindigkeitsvorteile. Wie auch bei der allgemeinen Röntgenrückstreutechnik ist diese Methode bei tief vergrabenen Minen wirkungslos.

#### **4.2 Kombination aus Röntgenrückstreutechnik und Wasserdüsensystem**

Die University of Missouri-Rolla hat ein System entwickelt, welches die Röntgenrückstreutechnik als zweite Stufe eines Zwei-Phasen-Systems verwendet. Zuerst wird mittels Wasserdüsen die Oberfläche des Bodens von der Vegetation gesäubert, damit die Messung nicht behindert wird. An der Oberfläche liegende Minen können dabei eventuell sogar freigelegt werden. Anschließend setzt dann die bekannte Röntgenrückstreutechnik ein, um nach Minen zu suchen.

#### **4.3 Minendetektion durch klassisches Röntgenverfahren**

Hierbei wird ein Loch senkrecht in die Erde gebohrt, in welches eine Quelle heruntergelassen wird, um den Boden von unten abzutasten. Der Detektor bleibt oben installiert und nimmt wie bei der herkömmlichen Bildgewinnung je nach Stärke der photoelektrischen Absorption unterschiedlich viele Photonen auf. Wenn der untersuchte Bereich gesichert ist, wird an einer weiter entfernten Stelle ein zusätzliches Loch gebohrt, an der dieser Vorgang wiederholt wird. Es ist davon auszugehen, dass diese Art der Bildgewinnung zeitintensiver und damit unpraktikabler als die Röntgenrückstreutechnik ist.

## 5 Praktische Resultate

Dieses Kapitel beinhaltet Versuche und Ergebnisse der verschiedenen zuvor erwähnten Institutionen, woran der Nutzen von Röntgenverfahren zur Minendetektion deutlich gemacht werden soll.

### 5.1 Klassifizierung von Minen

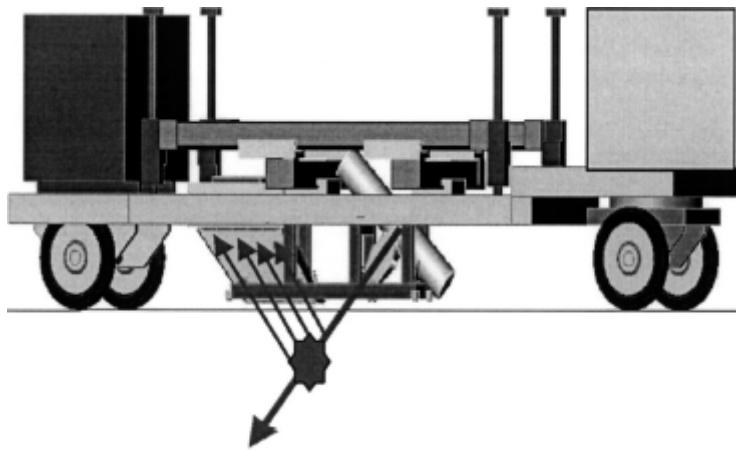
Minen können nach unterschiedlichen Kriterien eingeordnet werden und obwohl es zahlreiche Varianten bei Minen gibt, werden sie für die folgende Betrachtung in Antipersonen- und Antipanzerminen unterteilt, die bei Röntgenverfahren unterschiedliche Resultate ergeben.

Antipersonenminen sind gewöhnlich bis zu 3 cm tief im Boden vergraben und enthalten ca. 15 – 240 g Sprengstoff, der eine Dicke von ca. 1,5 cm hat, wohingegen Antipanzerminen mehr als 9 kg Sprengstoff bei ca. 10 cm Dicke enthalten und bis zu 30 cm tief liegen können. Wie bereits beschrieben wurde, ist die Wahl bestimmter Faktoren eines Röntgengerätes davon abhängig, wie dick die Sprengladung ist und wie tief im Boden sich die Mine befindet.

Im Folgenden werden zwei Systeme beschrieben, die jeweils auf einem Fahrzeug montiert sind und eine Röntgenröhre verwenden. Auf Grund ihres Gewichtes ist es nicht möglich, diese Systeme tragfähig zu machen, so dass die Installation auf einem Fahrzeug Voraussetzung für die Minensuche ist.

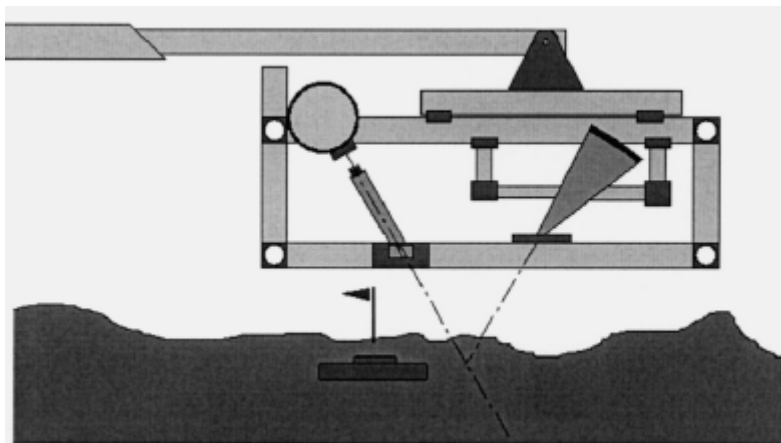
### 5.2 YXLON

Die Firma YXLON hat ein Gerät zur Entdeckung verdeckt liegender Kampfmittel – ComScan450 – konstruiert, welches auf der Abbildung 5.1 dargestellt ist. Es wird eine 450 KeV Röntgenquelle und ein Detektor mit Szintillator-Kristallen [NaJ(Tl)] verwendet, die beide Kollimatoren haben und in einem Winkel von 90° zueinander stehen, was der Anordnung (a) der Abbildung 3.5 entspricht. Zu Testzwecken wird der Anhänger von einem Laster über ein präpariertes Minenfeld gezogen, in welchem Objekte vergraben sind, die sprengstoffähnliche Substanzen enthalten, jedoch keine Detonation bewirken. Das System ist in der Lage, mit einer Messung eine unterschiedlich große Fläche mit einem Maximum von ca. 1,35 m<sup>2</sup> abzutasten. Quelle und Detektor bleiben dabei unverändert zueinander ausgerichtet und können auf eine Höhe von 5 – 50 cm über dem Boden motorisch angebracht werden.



**Abb. 5.1:** Scannerprototyp ComScan450 auf einem mobilen Anhänger<sup>19</sup>

Der Anhänger kann in der Praxis nicht verwendet werden, weil der Laster zuerst unabetastete Bereiche passieren müsste, bis das System eine Messung vornehmen kann. Deshalb ist für den praktischen Einsatz eine alternative Konstruktion notwendig, die in der Abbildung 5.2 dargestellt ist. In der Abbildung ist ein Trägerarm ersichtlich, der auf einem Fahrzeug angebracht werden muss, so dass er sich vor dem Fahrzeug und über dem Boden befindet. Das ComScan450 wird am Ende des Trägerarms installiert und tastet Bereiche nach Minen ab, bevor das Fahrzeug diese überquert.



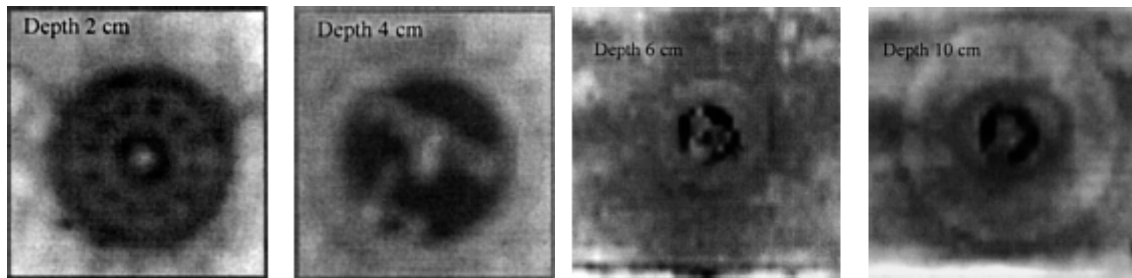
**Abb. 5.2:** Trägerarm für praktischen Einsatz des ComScan450<sup>20</sup>

Ursprünglich wurde der Detektor mit nur einem Kanal ausgestattet, weswegen nur eine Tiefenschicht pro Messung ausgewertet werden konnte. Für ein Bild mussten Messungen mehrerer Tiefen vorgenommen werden, so dass die Abtastung einer 30 cm<sup>2</sup> großen Fläche über eine Stunde gedauert hat. Folglich wurde ein Mehrkanaldetektor installiert, dessen Kanäle auf jeweils eine Tiefenschicht ausgerichtet sind und eine standardmäßige

<sup>19</sup> Quelle: Niemann et al. (2002), S. 635

<sup>20</sup> Quelle: Niemann et al. (2002), S. 636

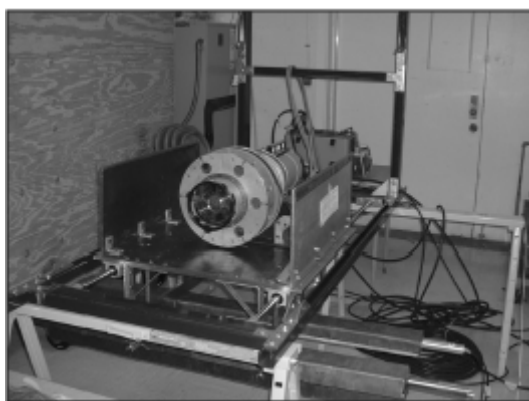
Auflösung von jeweils 3 LP/mm haben, die aber variiert werden kann. Jeder Kanal benötigt einen eigenen Vorverstärker und einen Zähler für die Speicherung, um ein paralleles Abtasten der Tiefenschichten zu ermöglichen. Mit dem Gerät sollen Bilder von bis zu 20 cm tief vergrabenen Minen noch zur Detektion ausreichen. Das Gerät benötigt für die Abtastung einer Fläche von 0,4 m<sup>2</sup> mit der Standardauflösung etwa 5 Minuten.



**Abb. 5.3:** Aufnahmen einer Antipersonen- und einer Antipanzermine<sup>21</sup>

Schichtbilder mit 2 und 4 cm Tiefe einer Antipersonenmine mit ca. 12,5 cm Durchmesser (linke Bilder) und Schichtbilder mit 6 und 10 cm Tiefe eine Antipanzermine mit ca. 31,5 cm Durchmesser (rechte Bilder) sind in der Abbildung 5.3 zu sehen. Es ist zu erkennen, dass die Bilder beider Minen bei zunehmender Tiefe unschärfer werden, aber dennoch zur Erkennung geeignet sind. Weiterhin ist festzustellen, dass Strukturen der Minen aufgezeigt werden, deren Deutlichkeit ebenfalls mit Zunahme der Tiefe abnimmt.

### 5.3 University of Florida

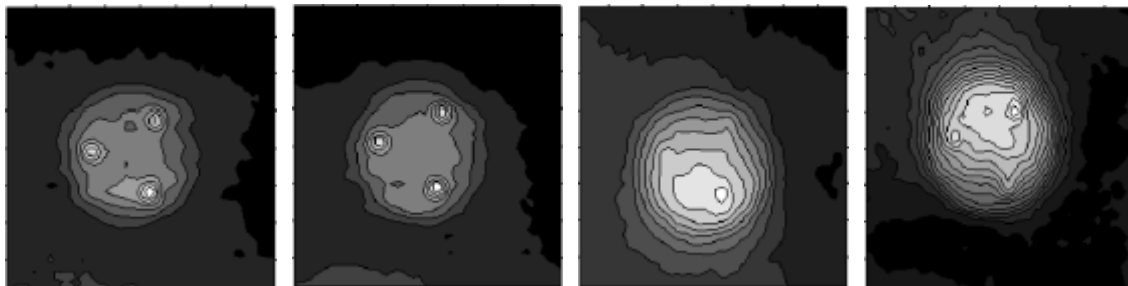


**Abb. 5.4:** X-Ray Mine Imaging System<sup>22</sup>

<sup>21</sup> Quelle: Niemann et al. (2002), S. 635f.

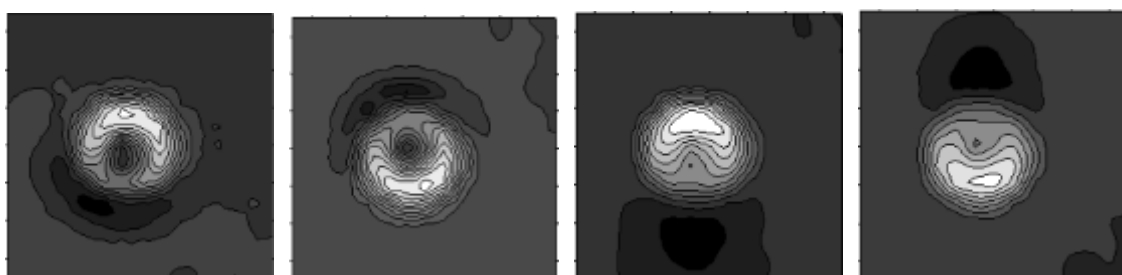
<sup>22</sup> Quelle: MacDonald et al. (2003), Anhang M, S. 220

In der Abbildung 5.4 ist das XMIS der University of Florida auf dem linken Bild zu erkennen; das rechte Bild zeigt das auf einem Wagen installierte System im Einsatz. Das XMIS benutzt eine luftgekühlte 160 KeV Röntgenquelle, die ca. 80 cm über dem Boden angebracht ist und von rotierenden Kollimatoren umgeben ist. Um die Quelle herum sind 10 Löcher angebracht, durch welche die Röntgenstrahlung austreten kann, ohne von der Bleischicht abgefangen zu werden. Durch die Rotation wird die Richtung des Strahls festgelegt. Das Gerät wiegt etwa 150 kg, benötigt 700 Watt und wurde so eingestellt, dass es eine Fläche von 1 m<sup>2</sup>/min abtastet und Bilder generiert.



**Abb. 5.5:** Im Labor erstellte Bilder einer TMA-4 Antipanzermine<sup>23</sup>

Die Abbildung 5.5 enthält Bilder einer 2,5 cm tiefen Antipanzermine, die von links nach rechts Aufnahmen des vorderen unkollimierten, des hinteren unkollimierten, des vorderen kollimierten und des hinteren kollimierten Detektors darstellen. Es ist zu erkennen, dass der Vorteil der beiden linken Abbildungen in der Detailtreue liegt, da bestimmte Strukturen zu erkennen sind, die in den rechten Bildern nicht auftauchen. Allerdings sind die Grauwerte näher an dem Farbton des Bodens dran, was bei den Bildern der kollimierten Detektoren nicht der Fall ist; die Helligkeitsunterschiede sind dort wesentlich ausgeprägter. Weiterhin ist eine Verschiebung des Zentrums der Mine bei den rechten Bildern zu sehen, mit der die Tiefe der Mine ermittelt werden kann, weil sich die Zentren mit zunehmender Tiefe weiter voneinander entfernen.



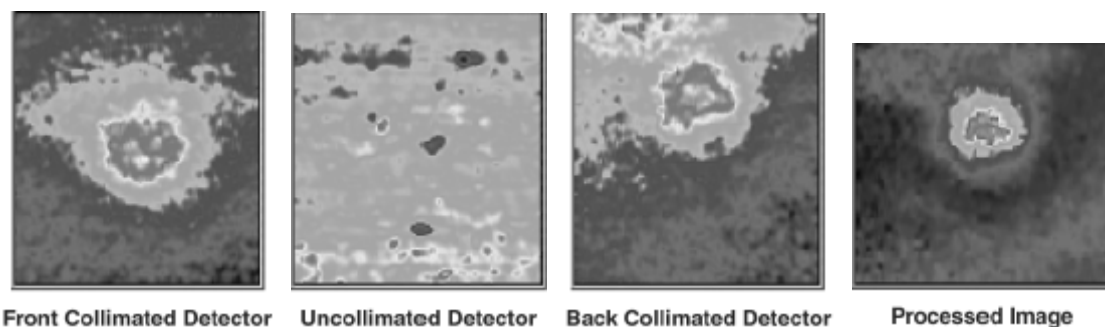
**Abb. 5.6:** Im Labor erstellte Bilder einer TS/50 Antipersonenmine<sup>24</sup>

<sup>23</sup> Quelle: MacDonald et al. (2003), Anhang M, S. 210

<sup>24</sup> Quelle: MacDonald et al. (2003), Anhang M, S. 212

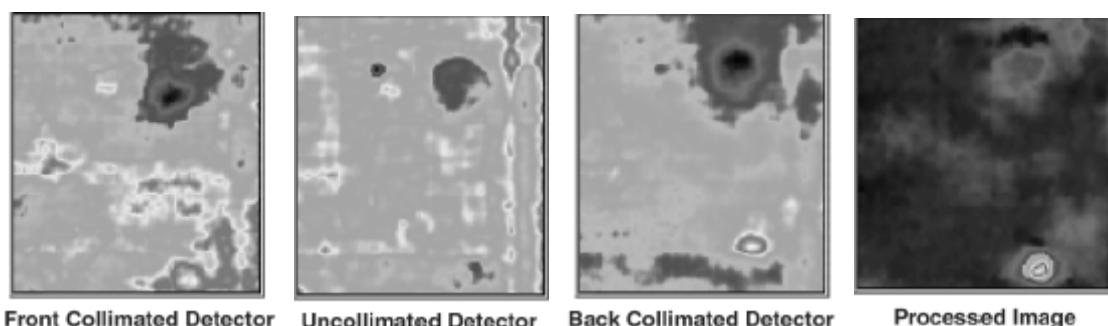
Zu Vergleichszwecken sind in der Abbildung 5.6 Bilder einer sich an der Oberfläche befindenden Antipersonenmine mit 9 cm Durchmesser dargestellt, deren Reihenfolge der Anordnung der Abbildung 5.5 entspricht. Wie bei der Antipanzermine sind auch hier die oben genannten Eigenschaften der unterschiedlichen Bilder erkennbar. Auf Grund der Größe und Art der Mine lassen sich Strukturen bei den beiden linken Bildern deutlich schlechter aufzeigen als bei der Antipanzermine.

In den Abbildungen 5.7 und 5.8 sind Aufnahmen des XMIS im Einsatz auf dem Feld zu sehen. Es wurde bereits erwähnt, dass im Gegensatz zur Architektur im Labor das XMIS nur einen unkollimierten Detektor hat, dessen Funktion nun deutlich gemacht wird, indem das endgültige Bild dargestellt wird, welches durch Subtraktion des Bildes des unkollimierten Detektors von den anderen generiert wird.



**Abb. 5.7:** Auf dem Feld erstellte Bilder einer TS/50 Antipersonenmine<sup>25</sup>

Die Aufnahmen einer VS1.6 Antipanzermine mit einem Durchmesser von 22 cm, die 2,5 cm tief im Boden liegt sind in der Abbildung 5.7 zu erkennen. Die Bilder von den kollimierten Detektoren sind verschwommen und haben, wie bei den Versuchen im Labor, ein verschobenes Zentrum. Diese Effekte verschwinden jedoch beim fertiggestellten Bild, das in guter Qualität dargestellt ist.



**Abb. 5.8:** Auf dem Feld erstellte Bilder einer TS/50 Antipersonenmine<sup>26</sup>

<sup>25</sup> Quelle: MacDonald et al. (2003), Anhang M, S. 216

<sup>26</sup> Quelle: MacDonald et al. (2003), Anhang M, S. 218

Eine TS/50 Antipersonenmine in 5 cm Tiefe ist in der Abbildung 5.8 dargestellt, wobei der Boden mit einer erheblichen Menge an Laub und Steinen bedeckt war. Die herkömmlich erstellten Bilder geben kaum Auskunft darüber, ob und wo sich eine Mine befinden könnte, was bedingt durch die Tiefe und Vegetation ist. Das relevante Bild jedoch zeigt relativ genau, wo sich die Mine befindet.

Anhand der Versuche die mit XMIS auf dem Feld durchgeführt wurden, ergaben sich bestimmte Kennzahlen für eine Suche nach verdeckt liegenden Minen mit bis zu 5 cm Tiefe. Die Erkennungswahrscheinlichkeit war 100%, die Falschalarmwahrscheinlichkeit lag bei 3% und die Falschalarmrate betrug  $0,1/m^2$ . Bei diesen Versuchen handelte es aber weniger um eine Minendetektion als um eine Bestätigung von vorher festgelegten Minenstandorten. Dabei hat sich jedoch gezeigt, dass Bilder von mehr als 10 cm tief vergrabenen Minen unbrauchbar sind, so dass bei diesen Tiefen die Detektion wesentlich unwahrscheinlicher ist. Obwohl es schwer vorherzusagen ist, hat die University of Florida versucht, den Aufwand für ein XMIS zu ermitteln, das mit einigen Modifikationen, wie z.B. kleinere Szintillatoren, dünnere Kollimatoren und eine schwächere Quelle optimiert worden ist. Der Aufwand pro Gerät sollte sich auf etwa \$ 50.000 und bei zahlreicher Fertigung sogar auf ca. \$ 30.000 belaufen.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Ausarbeitung wurde die Bildgewinnung durch Röntgenverfahren beschrieben und bewertet. Generell lässt sich behaupten, dass sich Röntgenverfahren hauptsächlich zur Minendetektion eignen, wenn dabei der Compton-Effekt berücksichtigt wird. Unabhängig von diversen Geometrien und Techniken wird für das Auftreten dieses Effektes eine Quelle benötigt, die Photonen emittiert, welche in einem bestimmten Energiebereich liegen. Es wurde gezeigt, dass Gammaquellen diese Eigenschaft schlecht erfüllen, so dass der Einsatz einer Röntgenquelle unausweichlich ist. Das führt zu einem größeren Gewicht der Apparatur und wegen der Photonenstärke auch zu dickeren Kollimatoren vor den Detektoren, was wiederum auf einen Anstieg des Gewichts hinausläuft. Das hohe Gewicht der Apparatur und die Intensität der Röntgenstrahlung sind für ein tragbares Gerät große Hindernisse, weil beim Anwender bereits bei einem Gewicht des Systems von wenigen kg Ermüdungserscheinungen auftreten, die zu Konzentrationsstörungen führen können. Damit ergibt sich für den Benutzer nicht nur die Gefahr der Aussetzung radioaktiver Strahlung, sondern auch die Gefahr des Auslösens einer Mine durch Unaufmerksamkeit bei der Suche.

Die Versuche mit auf Fahrzeugen angebrachten Röntengeräten haben gezeigt, dass sich gute Bilder bei verschiedenen Minen und unterschiedlicher Beschaffenheit der Böden ergeben, so dass neben der Minendetektion auch noch eine genaue Lokalisierung und eventuell sogar eine Identifikation von Minen möglich ist, wenn das System mit einer Datenbank in Verbindung gebracht wird.

Die größten Nachteile von Röntgenverfahren sind aber die relativ langsame Abtastung und Bildgewinnung sowie die geringe Tiefe, bis zu der Röntgenverfahren wirkungsvoll sind. Da es Minen gibt, die so tief vergraben sind, dass zurückgestreuten Photonen nicht mehr vom Detektor registriert werden können, besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass Minen übersehen werden. Bei Antipanzermine wäre das verheerend, da die Systeme auf Grund ihres Gewichtes auf einem Wagen installiert werden müssen, der beim Überfahren der Mine diese eventuell auslösen könnte. Zahlreiche in dieser Ausarbeitung erläuterten Aussagen unterstreichen eine theoretische Durchführbarkeit von Bildgewinnung durch Röntgenverfahren aber verdeutlichen gleichzeitig enorme Defizite in der praktischen Anwendung. Die Vergabe des Friedensnobelpreises an die „International Campaign to Ban Landmines“ im Jahr 1997 hat die Aufmerksamkeit auf die Problematik der Minen verstärkt, so dass seitdem eine vermehrte finanzielle Unterstützung zur Beseitigung von Landminen stattgefunden hat. Vielleicht gelingt es durch intensive Forschung, die Schwierigkeiten bei der Anwendung von Röntgenverfahren zu beseitigen, so dass diese Methode eines Tages standardisiert eingesetzt werden kann.



## Literaturverzeichnis

- Deutsch, H.-H.: Kampfmittelerkundung und Beseitigung, Europäische Sicherheit, 6/2001
- Dugan, E.; Jacobs, A.: Detection of Subsurface Defects Using X-Ray Lateral Migration Radiography – A New Backscatter Imaging Technique, Nuclear and Radiological Engineering Department, University of Florida, Gainesville, Florida, Februar 2003
- MacDonald, J.; Lockwood, J.-R. et al.: Alternatives for Landmine Detektion, Rand Science and Technology Policy Institute, 2003
- Niemann, W.; Olesinski, S.; Thiele, T.; Martens, G.; Carlsen, I.-C.: Detection of buried landmines with X-ray backscatter technology, Insight, Vol. 44, No. 10, Oktober 2002
- Olesinski, S.: Das Prinzip der Röntgen-Rückstreuung und deren Anwendung zur Untersuchung verdeckt verlegter Kampfmittel, YXLON International X-ray GmbH, 13. September 2001
- Roder, F.; Van Koyenburg, R.: Theory and Application of X-Ray and Gamma-Ray Backscatter to Landmine Detection, U.S. Army Mobility Research and Development Center, Fort Belvoir, Virginia, Report 2134, März 1975
- „Röntgenstrahlung“: Microsoft® Encarta® Online-Enzyklopädie 2003  
<http://de.encarta.msn.com> © 1997-2003 Microsoft Corporation. Alle Rechte vorbehalten
- „Röntgenstrahlung“: Universität Erlangen, Institute für Physik, 15.04.2002  
<http://www.physik.uni-erlangen.de/praktik/nebenfach/R%F6ntgenstrahlung.pdf>