

Thema:

## **Bildgewinnung**

### **Ausarbeitung**

im Rahmen des Seminars „Unterstützung von Landminendetektion durch  
Bildauswertungsverfahren und Robotereinsatz“

am Institut für Informatik

Themensteller: Dr. Dietmar Lammers/Dipl.-Inform. Steffen Wachenfeld

vorgelegt von: Nina Büchel  
Gescherweg 21  
48161 Münster  
0251/6205827  
nib@muenster.de

Abgabetermin: 2004-01-05

## **Inhaltsverzeichnis**

Inhaltsverzeichnis .....	II
Abbildungsverzeichnis .....	III
Stichwortverzeichnis .....	IV
1 Einleitung.....	1
2 Bildgewinnung.....	3
3 Elektromagnetisches Spektrum.....	5
4 Nicht-Optische Verfahren zur Bildgewinnung.....	8
4.1 Schallwellen.....	8
4.2 Elektrische Impedanz Tomographie .....	10
4.3 Magnet Resonanz Tomographie .....	12
4.4 Bildgewinnung durch Berührung .....	14
5 Verfahren mit Elektromagnetischen Wellen.....	16
5.1 Röntgen-Verfahren .....	16
5.2 Sichtbares Licht .....	18
5.3 Infrarot-Verfahren.....	21
5.4 Radarverfahren .....	24
6 Vergleich der Verfahren .....	28
7 Zusammenfassung und Ausblick .....	31
Literaturverzeichnis .....	32

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Prozess der Mustererkennung.....	4
Quelle: <a href="http://www.zgdv.de/zgdv/departments/z2/Z2Staff/schnaide/local_images/ME2003-05.pdf">http://www.zgdv.de/zgdv/departments/z2/Z2Staff/schnaide/local_images/ME2003-05.pdf</a> .	
Abb. 2: Wellenlänge und Frequenz.....	5
Abb. 3: Elektromagnetisches Spektrum.....	6
Quelle: <a href="http://www.roro-seiten.de/physik/lk12/emwellen/elektromagnetisches_spektrum.html">http://www.roro-seiten.de/physik/lk12/emwellen/elektromagnetisches_spektrum.html</a>	
Abb. 4: Impedanztomographie.....	11
Quelle: Baumeister (2001), S. 11.	
Abb. 5: Elektrische Impedanz Tomographie.....	11
Quelle: <a href="http://www.eit.org.uk/images/eit.gif">http://www.eit.org.uk/images/eit.gif</a>	
Abb. 6: Magnet Resonanz Tomographie.....	13
Quelle: <a href="http://www.harrasrad.de/kernspin.html">http://www.harrasrad.de/kernspin.html</a>	
Abb. 7: Touchsensor eines MindStorms-Roboter von LEGO.....	14
Quelle: <a href="http://www.csdm.qc.ca/SJdelaLande/lesclasses/4web/wwwrobotique/images/touchsensor.gif">http://www.csdm.qc.ca/SJdelaLande/lesclasses/4web/wwwrobotique/images/touchsensor.gif</a>	
Abb. 9: Röntgenbild.....	17
Quelle: Microsoft Encarta Enzyklopädie 2004	
Abb. 10: Frequenzen.....	19
Abb. 11: Landmine.....	20
Quelle: <a href="http://static.howstuffworks.com/gif/landmine-dod-closeup.jpg">http://static.howstuffworks.com/gif/landmine-dod-closeup.jpg</a>	
Abb. 12: Clustermine.....	20
Quelle: <a href="http://www.protel.co.nz/calm/YellowClusterBomblet.jpg">http://www.protel.co.nz/calm/YellowClusterBomblet.jpg</a>	
Abb. 13: Infrarotbild I.....	22
Quelle: <a href="http://www.thermografie-schweiger.de/Hand1.jpg">http://www.thermografie-schweiger.de/Hand1.jpg</a>	
Abb. 14: Infrarotbild II.....	22
Quelle: <a href="http://www.itap.de/thermohaus.jpg">http://www.itap.de/thermohaus.jpg</a>	
Abb. 15: Minensuche – Infrarot.....	22
Quelle: <a href="http://www.spacecomputer.com/HMD_ground.html">http://www.spacecomputer.com/HMD_ground.html</a>	
Abb. 16: Stealth-Flugzeug B-2 .....	25
Quelle: <a href="http://www.cs.colorado.edu/~lindsay/talk/b-2.jpg">http://www.cs.colorado.edu/~lindsay/talk/b-2.jpg</a>	
Abb. 17: Stealth-Flugzeug B-2 - seitlich.....	25
Quelle: <a href="http://www.supervideo.com/b2desert.jpg">http://www.supervideo.com/b2desert.jpg</a>	
Abb. 18: Anti-Panzer-Mine - 15 cm tief.....	27
Quelle: <a href="http://www.osig.uah.edu/pdf/pol/Polarization%2520Mine%2520Detection.pdf">http://www.osig.uah.edu/pdf/pol/Polarization%2520Mine%2520Detection.pdf</a>	
Abb. 19: Anti-Personen-Mine - 5 cm tief.....	27
Quelle: <a href="http://www.osig.uah.edu/pdf/pol/Polarization%2520Mine%2520Detection.pdf">http://www.osig.uah.edu/pdf/pol/Polarization%2520Mine%2520Detection.pdf</a>	

## **Stichwortverzeichnis**

APM	Anti Person Mine
ATM	Anti Tank Mine
CT	Computer Tomographie
EIT	Elektrische Impedanz Tomographie
GPR	Ground Penetrating Radar
GPS	Global Positioning System
HMD	Hyperspectral Mine Detection
Hz	Hertz
IR	Infrarot
MRT	Magnet Resonanz Tomographie
OSU	Ohio State University
RADAR	Radio Detection and Ranging
TNT	Trinitrotoluol
UNO	United Nations Organization
US	United States

## 1 Einleitung

Eine Landmine ist ein in einem Gehäuse aus Metall, Kunststoff oder anderem Material untergebrachter Sprengsatz - meist Trinitrotoluol (TNT) - in oder auf dem Erdboden oder einer anderen Oberfläche zur Sperrung von Geländeabschnitten. Minen sind so konzipiert um durch Gegenwart, Nähe oder Berührung des Feindes gezündet und zur Explosion gebracht zu werden um so feindliche Truppen zu zerstören und kampfunfähig zu machen. Sie wird als Waffe vom Opfer selbst ausgelöst.<sup>1</sup>

Eine genaue Zahl aller Todesopfer durch Landminen ist nicht bekannt, laut UNO<sup>2</sup>-Angaben sterben monatlich jedoch mindestens 2.000 Menschen an Verletzungen durch Landminen.<sup>3</sup> Rund 100.000 Minen werden pro Jahr gefunden und entschärft. Da es 2001 laut U.S. State Department geschätzt 45 bis 50 Millionen unentdeckte Minen gibt, können sich die Arbeiten rein rechnerisch noch weitere 450 bis 500 Jahre hinziehen.

Das Ziel dieser Ausarbeitung ist es einen groben Überblick über unterschiedliche Verfahren zur Bildgewinnung und insbesondere zur Erkennung von Landminen zu geben. Im Mittelpunkt stehen Verfahren, die auf Elektromagnetischen Wellen beruhen: Das Radar-, Infrarot- und Röntgenverfahren, oder solche Verfahren, die Bilder im Bereich des für den Menschen sichtbaren Lichts gewinnen. Es werden Vor- und Nachteile herausgearbeitet, die sich bei der Verwendung der Verfahren zur Landminendetektion ergeben, und für einen Vergleich aller Verfahren herangezogen. Im folgenden *zweiten Kapitel* wird zunächst auf Bildgewinnung allgemein eingegangen, der Begriff wird definiert und genauer beschrieben.

Im *dritten Kapitel* wird die physikalische Grundlage für elektromagnetische Strahlungen erklärt. Dieses Thema wird auf Grund seiner Komplexität nur insoweit behandelt, um anschließend die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Bildgewinnung detaillierter erläutern zu können.

Im *vierten Kapitel* werden weitere Bildgebenden Verfahren vorgestellt, die nicht auf Auswertung elektromagnetischer Strahlungen basieren.

---

<sup>1</sup> Vgl. akademie.de asp GmbH (2003) und Küchenmeister (2003).

<sup>2</sup> „Vereinte Nationen (UNO für United Nations Organization), weltweite Staatenorganisation zur Erhaltung des Weltfriedens, zur Förderung der internationalen Zusammenarbeit und wirtschaftlichen und sozialen Entwicklung sowie zur Durchsetzung der allgemeinen Menschenrechte auf der Grundlage der Gleichberechtigung und Selbstbestimmung der Völker.“ [Quelle: Encarta, „Vereinte Nationen“]

<sup>3</sup> Vgl. Küchenmeister (2003).

Anschließend stehen im *fünften Kapitel* auf Elektromagnetischen Wellen basierende Möglichkeiten zur Bildgewinnung im Mittelpunkt. Es werden sowohl Verfahren erklärt, die auf Röntgen-, Radar- und Infrarotstrahlen beruhen, als auch solche, die mit für Menschen sichtbarem Licht auskommen.

Im *sechsten Kapitel* werden die vorgestellten Verfahren anhand ihrer Vor- und Nachteile gegenüber gestellt. So wird ersichtlich, welche Verfahren für welche Einsatzgebiete und welche Anforderungen geeignet sind.

Das *siebte Kapitel* gibt eine Zusammenfassung der behandelten Thematik und einen Ausblick auf weitere Forschung bezüglich Bildgewinnung und Landminendetektion.

## 2 Bildgewinnung

In diesem Kapitel wird zuerst der Begriff „Bild“ definiert, bevor anschließend das Verfahren der Bildgewinnung in einen Gesamtablauf zur Mustererkennung eingeordnet wird. Dadurch wird ein Überblick über das Thema „Unterstützung von Landminendetektion durch Bildauswertungsverfahren“ gegeben.

Die Frage nach einer umfassenden und einheitlichen Definition eines Bildes gehört zu den ältesten und zugleich zu den am wenigsten geklärten in der Wissenschaft. Angesichts der hohen kulturellen Bedeutung von Bildern ist diese Frage seit Jahrtausenden nahe liegend. Umso erstaunlicher ist es, dass der Entwicklungsstand der Bildwissenschaften und der Bildphilosophie noch recht dürftig ist.<sup>4</sup>

Das Wort „Bild“ kommt von dem althochdeutschen „bilidi“, was so viel wie „Nachbildung“ oder „Abbild“ bedeutet. Ursprünglich war mit dem Wort ein „Wunder(zeichen)“ gemeint.<sup>5</sup> In aktuellen Definitionen wird unter einem Bild eine „mit künstlerischen Mitteln [...] geschaffene Darstellung von etwas“<sup>6</sup> verstanden. Weitere Definitionen für das „Bild“ reichen weit auseinander, von „Darstellung von Dingen auf einer Fläche“<sup>7</sup> bis hin zum „Spezialfall der analogen Abbildung“<sup>8</sup> - wobei eine Abbildung in der Optik „die Projektion eines Objekts durch ein optisches System auf die Bildebene“ darstellt<sup>9</sup>. Es gibt es zahlreiche Auslegungen des Begriffs, jedoch keine einheitliche Begriffsbestimmung.

Die „Bildgewinnung“ ist der Prozess, in dem ein solches Bild gewonnen wird. Es soll eine Repräsentation der Umgebung erschaffen werden, unabhängig von der Art und Weise, wie dies geschieht. Betrachtet man Bildgewinnung im Zusammenhang mit Landminendetektion, steht die Erkennung von Gegenständen und vergrabenen Objekten, insbesondere von Landminen, im Vordergrund. In dieser Ausarbeitung werden einige bekannte Verfahren zur Bildgewinnung genauer erklärt. Im Mittelpunkt stehen Verfahren, die Infrarot-, Radar- oder Röntgenstrahlen nutzen. Des weiteren wird auf die Bildgewinnung im Spektrum des für den Menschen sichtbaren Lichts eingegangen. Andere Möglichkeiten zur Bildgewinnung werden in den nächsten Kapiteln betrachtet, die nicht auf dem elektromagnetischen Spektrum beruhen.

---

<sup>4</sup> Vgl. Scholz (2003).

<sup>5</sup> Vgl. akademie.de asp GmbH (2003).

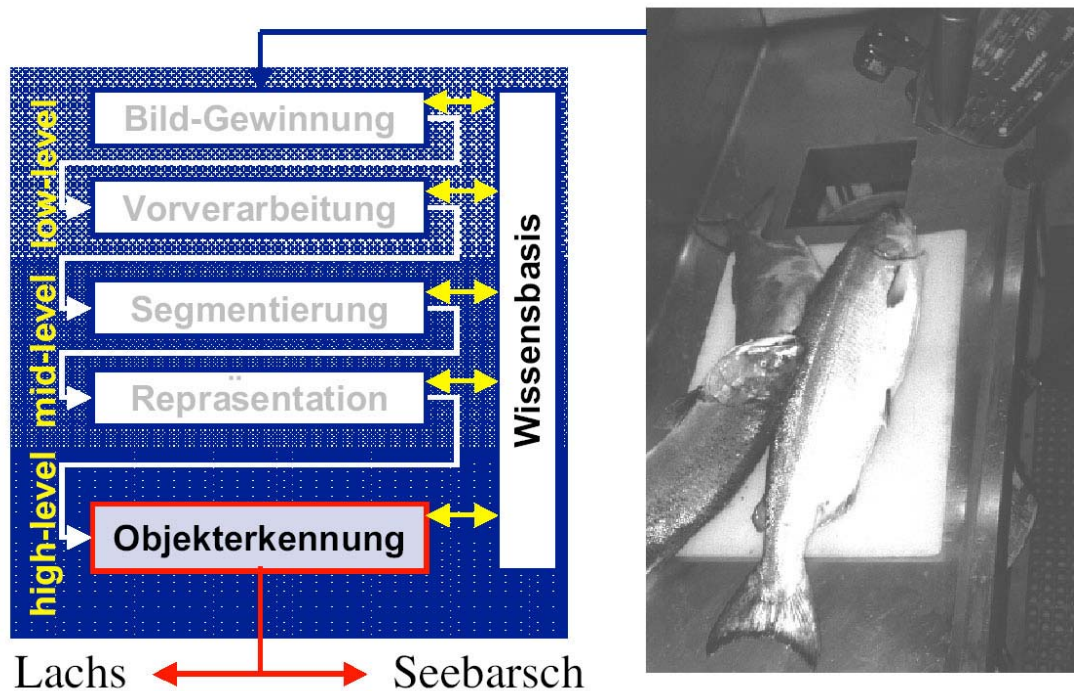
<sup>6</sup> Vgl. akademie.de asp GmbH (2003).

<sup>7</sup> Vgl. Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG (1972), Band 2, S. 148.

<sup>8</sup> „Abbildungen sind analoge Symbole, also Bilder, Gemälde, Fotografien, Zeichnung, Pläne, Schemata, Ikone, Statuen, usw.“ [Quelle: Hyperkommunikation (2003).]

<sup>9</sup> Vgl. Wikipedia (2003).

Die Einordnung der Bildgewinnung in den Gesamtablauf der Mustererkennung lässt sich wie in *Abbildung 1* dargestellt beschreiben:<sup>10</sup>



**Abb. 1:** Prozess der Mustererkennung

Allen voran steht die Bildgewinnung. Es folgt die Vorverarbeitung der gewonnenen Bilddaten<sup>11</sup> (low-level). Im nächsten Schritt werden die Daten segmentiert und anschließend repräsentiert (mid-level). Auf Basis dieser Schritte kann später eine Objekterkennung<sup>12</sup> durchgeführt werden (high-level).

Im Bezug auf die Landminendetektion heißt dies, dass Inhalte von Bildern automatisch auf Ähnlichkeit mit Landminen überprüft und ausgewertet werden.

<sup>10</sup> Vgl. Schnaider (2003).

<sup>11</sup> Dieses Thema wird detaillierter von Gliet et. al. (2003) bearbeitet.

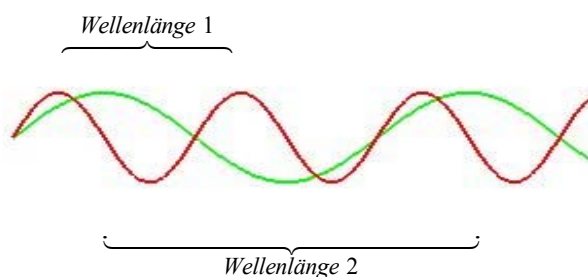
<sup>12</sup> Dieses Thema wird detaillierter von Lambers, Grosse-Lordemann (2003) bearbeitet.



### 3 Elektromagnetisches Spektrum

Das für den Menschen sichtbare Licht bildet nur einen kleinen Teil des elektromagnetischen Spektrums. Zahlreiche weitere Strahlungen wie Röntgen-, Infrarot- oder Radarstrahlungen, ebenso wie Radio- und Funkwellen dazu gehören, sie unterscheiden sich nur durch ihre unterschiedlichen Wellenlängen.

Eine Wellenlänge wird definiert durch den Abstand zweier aufeinander folgender Wellenberge. In *Abbildung 2* sind exemplarisch zwei unterschiedlich große Wellenlängen dargestellt. Wechselstrom hat beispielsweise eine Wellenlänge von mehreren tausend Kilometern, im Gegenteil dazu besitzen die Gammastrahlen Wellenlängen von einem Tausendstel Pikometer. Eine Wellenart lässt sich weiterhin durch ihre Frequenz charakterisieren. Die in der Einheit Hertz gemessene physikalische Größe gibt die Wiederholung eines regelmäßigen Vorgangs in einer bestimmten Zeit an. Eine Frequenz von einem Hertz bedeutet, dass der Zyklus der betreffenden Schwingung einmal pro Sekunde auftritt. Die Größen Frequenz und Wellenlänge sind antiproportional zueinander und lassen sich mit der Formel  $v = \lambda \cdot f$  bestimmen. Dabei bezeichnet  $\lambda$  die Wellenlänge,  $f$  die Frequenz und  $v$  die Geschwindigkeit.



**Abb. 2:** Wellenlänge und Frequenz

Die Welle breitet sich innerhalb eines Mediums mit konstanter Geschwindigkeit aus. Allgemein lässt sich sagen, dass sich Wellen mit großer Wellenlänge oder dementsprechend mit niedriger Frequenz schlechter aufhalten lassen als solche mit kleiner Wellenlänge und hoher Frequenz. Aus diesem Grund werden Lang-, Mittel- und Kurzwellen auch zur Radio- und Rundfunkübertragung genutzt, weil es kaum Gegenstände gibt, die diese Wellen an ihrer Expansion hindern können.

Abbildung 3 gibt einen Überblick über das Elektromagnetische Spektrum: Die Länge der Wellen nimmt vom linken zum rechten Rand zu.

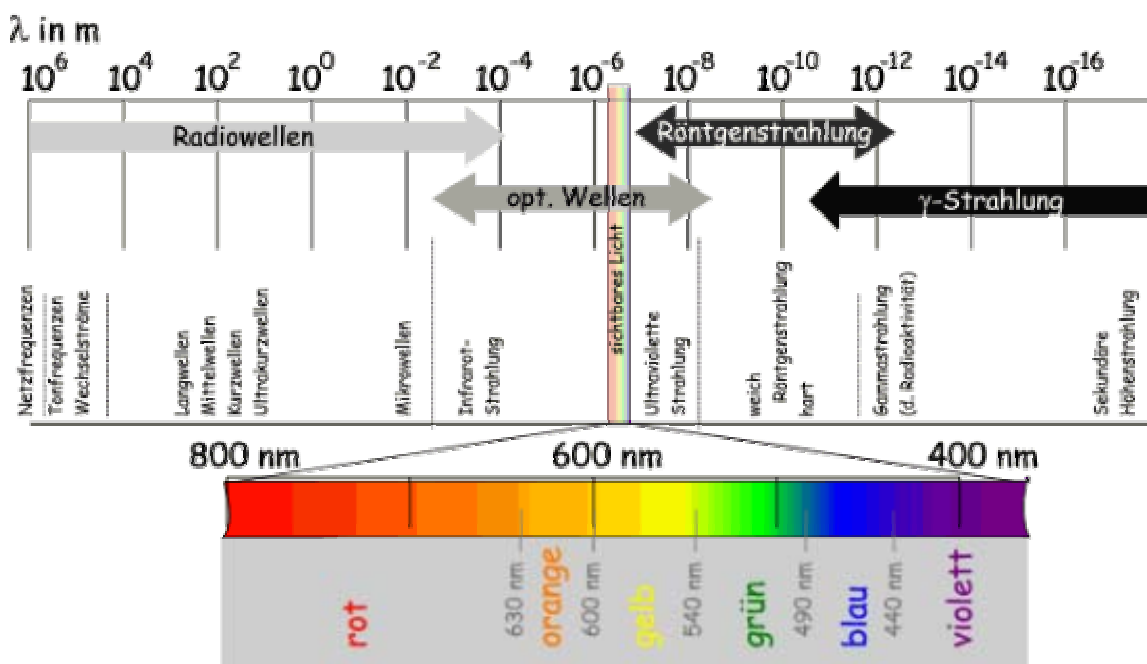


Abb. 3: Elektromagnetisches Spektrum

*Radarwellen* haben eine Wellenlänge von ungefähr einem Meter bis zu einigen Zentimetern. Vergleichbar mit dem Prinzip des Echos werden sie ausgesendet, von bestimmten Gegenständen reflektiert und gelangen dadurch zurück zum Sendergerät. Dort werden sie entsprechend weiterverarbeitet und machen so Objekte, auch wenn diese außerhalb des menschlichen Sichtbereichs liegen, erkennbar.<sup>13</sup>

Die Wellenlänge der *infraroten Strahlen* liegt etwa zwischen  $10^{-3}$  und  $10^{-6}$  Meter. Es handelt sich um eine elektromagnetische Strahlung, deren Wellenlänge etwas größer ist als die des sichtbaren roten Lichts. Mit Hilfe der Infrarotstrahlen lassen sich unter anderem Bilder von weit entfernten Gegenständen gewinnen, weshalb diese Strahlen in der Weltraumforschung genutzt werden. Auch Satelliten oder Flugzeuge können, ohne dass sie für den Menschen sichtbar sein müssen, auf Grund ihrer Wärmewirkung erkannt werden.<sup>14</sup>

Das *sichtbare Spektrum des Lichts* hat eine Wellenlänge zwischen 780 und 380 Nanometer: Es reicht beginnend bei der größten Wellenlänge, bei der Farbe Rot, bis hin zum Violett. Abhängig davon, wie die Lichtstrahlen von der bestrahlten Oberflächen reflek-

<sup>13</sup> Vgl. Encarta, „Radar“.

<sup>14</sup> Vgl. Encarta, „Infrarotstrahlung“.

tiert werden, ergeben sich die unterschiedlichen Farben. Bilder der Umgebung werden durch Foto- oder Videokameras gewonnen.

Die für das menschliche Auge unsichtbaren *Ultravioletten Strahlen* haben eine Wellenlänge im Bereich von 400 bis 3 Nanometer. Natürliche Ultraviolettstrahlen werden von der Sonne erzeugt, insbesondere kurze Wellenlängen unter 30 Nanometer können für Lebewesen gefährlich werden. Beim Menschen kann Ultraviolettstrahlung Sonnenbrand verursachen, über längere Zeit kann Hautkrebs entstehen.<sup>15</sup>

Es gilt, dass mit zunehmender Frequenz die Energie der Welle zunimmt. Aus diesem Grund können die im Wellenlängenbereich von  $10^{-8}$  bis  $10^{-15}$  Meter liegenden *Röntgenstrahlen* gefährlich für den Mensch sein. Sie durchdringen unterschiedlichste Materien, abhängig von der jeweiligen Dichte und den Atomsorten, aus denen diese zusammengesetzt sind. Es ist nun möglich, einen Blick ins Innere geschlossener Gegenstände werfen, ohne diese aufzuschneiden oder zu zerstören.<sup>16</sup>

Im Wellenlängenbereich von  $10^{-10}$  bis  $10^{-15}$  Meter existieren die so genannten *Gammastrahlen*, elektromagnetische Strahlen, die beim radioaktiven Zerfall von angeregten Kernzuständen auftreten, als Folge vorangegangener Kernumwandlung.<sup>17</sup> Sie sind die energiereichste Form der elektromagnetischen Strahlung<sup>18</sup> und können sogar zentimeterdicke Bleiplatten durchdringen.<sup>19</sup>

---

<sup>15</sup> Vgl. Encarta, „Ultraviolettstrahlung“.

<sup>16</sup> Vgl. Lossau (1995), S. 13.

<sup>17</sup> Vgl. Encarta, „Gammastrahlung“.

<sup>18</sup> „Ihre Energie beträgt etwa ein bis zwei Megaelektronenvolt. [...] Ein Elektronenvolt (eV) ist die Energiemenge, die ein Elektron erhält, wenn es durch eine Potentialdifferenz von einem Volt beschleunigt wurde. Ein Elektronenvolt entspricht  $1,60207 \times 10^{-19}$  Joule.“ [Quelle: Encarta, „Elektronenvolt“].

<sup>19</sup> Vgl. Encarta, „Radioaktivität“.

## 4 Nicht-Optische Verfahren zur Bildgewinnung

Auch ohne Elektromagnetische Wellen können Bilder der Umgebung gewonnen werden. Unter Bildgebenden Verfahren fasst man solche Vorgehensweisen zusammen, bei denen ein Bild eines Objektes aus Messungen einer Einwirkung auf das Objekt errechnet wird. Solche Verfahren bilden die Grundlage für bestimmte Bereiche der Industrie und der weiteren technischen Umwelt, um Bilder vom Inneren der Gegenstände zu erhalten. Die am weitesten verbreiteten Anwendungen der Bildgewinnung sind in der Medizin zu finden.<sup>20</sup> Die Diagnose, die auf Bildgebenden Verfahren basiert, ist Ausgangspunkt für zahlreiche Therapien und Eingriffe. In diesem Kapitel werden einige Möglichkeiten vorgestellt, die mit Hilfe von Schallwellen, Magnetfeldern oder Elektrischen Feldern Bilder gewinnen ohne das jeweilige Objekt erst öffnen zu müssen.

### 4.1 Schallwellen

Schall besteht aus Schwingungen oder Wellen, die bei Lebewesen über den Gehörsinn Geräuschempfindungen auslösen können. Das menschliche Ohr kann Schall mit Frequenzen zwischen ungefähr 20 und 20.000 Hertz (Hz) wahrnehmen. Schallwellen sind kleine, periodische (Luft-)Druckschwankungen, die sich in der Luft oder einer anderen Materie ausbreiten. Frequenzen oberhalb von 20 KHz werden Ultraschall genannt, unterhalb von 20 Hz Infraschall. Beide Bereiche sind in der Regel für das menschliche Ohr nicht hörbar. Verschiedene Tierarten können dagegen Frequenzen bis zu 200 KHz wahrnehmen.<sup>21</sup>

Der Ultraschall wird in Bereichen wie Physik, Chemie, Technik, Materialwissenschaft und Medizin angewandt. Beim Auftreffen der ausgesandten Schallwellen auf die Oberfläche eines Gegenstandes kommt es zu einer Frequenzänderung des reflektierten Strahles. Das so erzeugte Schallreflexionsmuster wird in einem Computer verarbeitet und in Bilder umgesetzt.<sup>22</sup> Auf diese Art wird ein Bild vom Inneren des menschlichen Körpers gewonnen. Die Ultraschalltechnik wird oft bei Schwangerschaften verwendet, sie dient der Überwachung des Wachstums und der Entwicklung des Ungeborenen. Im Gegensatz zu Röntgenstrahlen werden Ultraschallwellen als ungefährlich angesehen.

Tiere, wie etwa Echoortende Fledermäuse und Delfine, können Frequenzen des Ultraschalls nicht nur wahrnehmen, sondern auch selbst erzeugen. Sie senden so genannte Ortungslaute aus und nutzen die in den rückkehrenden Echos enthaltene Information zur

---

<sup>20</sup> Vgl. Baumeister (2001), S. 5.

<sup>21</sup> Vgl. Putzer, Kollmann (2002).

<sup>22</sup> Vgl. Encarta, „Ultraschalldiagnostik“.

Orientierung. So können sie sich nicht nur ohne Tageslicht ein genaues Bild von ihrer Umgebung machen, sondern auch in der Dunkelheit Beute orten und jagen.<sup>23</sup> Ebenso wie beim medizinischen Verfahren werden Ultraschallwellen ausgesendet, die sich innerhalb einer Materie mit konstanter Geschwindigkeit ausbreiten. Innerhalb von Luft gilt die konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit von etwa 340 Meter pro Sekunde<sup>24</sup>, innerhalb von Wasser breitet sich der Schall pro Sekunde hingegen ungefähr 1440 Meter aus.<sup>25</sup> Anhand der Zeitdifferenz zwischen Aussenden des Schalls und Wiedereintreffens des Echos kann nun ermittelt werden, wie weit das jeweilige Objekt entfernt ist.

Ein Echolot ist ein elektroakustisches Gerät, das mit Hilfe von Schallwellen die Wassertiefe misst.<sup>26</sup> Die ausgesendeten Schallschwingungen verbreiten sich im Wasser und werden vom Meeresboden oder anderen Dingen wie Riffs, Wracks oder Fischschwärmen reflektiert. Trifft das Echo ein, berechnet das Echolot aus der Zeitdifferenz zwischen Aussenden des Schalls und des Wiedereintreffens die Wassertiefe, wobei die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwellen im Wasser berücksichtigt wird. Es wird ein Bild des Meeresbodens gewonnen. Ähnlich funktioniert auch die Minensuche mit einem Echolot. Da die Minen nicht auf dem Meeresgrund liegen, sondern einige Meter darüber, etwa um U-Boote zu zerstören, lassen diese sich mit Hilfe der Reflektion von Schallwellen von der Meeresoberfläche lokalisieren.<sup>27</sup>

Nicht nur im Wasser funktioniert diese Methode, in minenreichen Gebieten werden ebenfalls Schallwellen in den Erdboden gesendet, die sich in diesem ausbreiten. Je nach Bodenart und Beschaffenheit stoßen diese Wellen auf vergrabene Minen und werden reflektiert, weshalb mit dieser Methode eine Analyse des Untergrunds möglich ist. Vergleichbar ist das Verfahren mit dem Klopfen an eine Wand, um dort versteckte Hohlräume zu entdecken. Unterschiedliche Materialien lassen sich so durch den Klang unterscheiden, ebenso wie bei den akustischen Verfahren zur Minensuche.<sup>28</sup> Wenn die Schallwellen von einem Lautsprecher ausgesandt werden, wird ein Teil der Wellen bereits vom Boden reflektiert, aber die restlichen Wellen dringen in den Boden ein und verbreiten sich dort. Stoßen diese nun auf einen vergrabenen Gegenstand, werden sie reflektiert und gelangen zur Erdoberfläche zurück. Dort werden sie dann entsprechend analysiert.

---

<sup>23</sup> Vgl. Schnitzler, Denzinger, Siemers (2003).

<sup>24</sup> „Bei 20° Celsius beträgt die Geschwindigkeit des Schalls etwa 343,42 Meter pro Sekunde.“ [Vgl. Kratz (2003)]

<sup>25</sup> Vgl. Wikipedia (2003).

<sup>26</sup> Vgl. Encarta, „Echolot“.

<sup>27</sup> Vgl. Federation of American Scientists (1999).

<sup>28</sup> „Specialized sensors can detect these vibrations without contacting the ground.“ [Quelle: MacDonald (2003), S. 27.]

Vorteile: Aufgrund von zahlreichen Einsatztests ist bekannt, dass dieses Verfahren hohe Erfolgsquoten hat, verbunden mit niedrigen Falsch-Alarm-Raten. Eine hohe Erfolgsquote besagt, dass annähernd alle vergrabenen Minen mit dieser Methode auch gefunden wurden. Eine niedrige Fehlalarmquote zeigt zusätzlich an, dass das Verfahren nicht von weiteren vergrabenen Gegenständen abgelenkt wurde und dort eine Mine anzeigte, wo keine vorhanden ist. Ein weiterer Vorteil des akustischen Verfahrens ist, dass diese Verfahren nicht von natürlichen Objekten, wie etwa Steinen oder unbedeutenden vergrabenen metallischen Gegenständen, abgelenkt werden. Es ist auch relativ unempfindlich gegenüber Wettereinflüssen, wenngleich ein gefrorener Boden die Reichweite der Schallwellen im Boden stark einschränkt.

Nachteile: Der größte Nachteil dieser Methode ist, dass ihre Reichweite im Boden auf etwa „einen Minen-Durchmesser“<sup>29</sup>, also maximal 30 Zentimeter beschränkt ist. Ein weiterer Nachteil ist die Geschwindigkeit des Systems: Um einen Quadratmeter Minenfläche zu untersuchen, brauchen die Sensoren bis zu 15 Minuten. Auch der Einsatz mehrerer paralleler Sensoren, der die Untersuchung beschleunigt, ist im Vergleich zu anderen Verfahren immer noch sehr langsam.

## 4.2 Elektrische Impedanz Tomographie

Die Elektrische Impedanz Tomographie, kurz EIT, ist ein neuartiges bildgebendes Verfahren, das auf großes Interesse auf Seiten der Medizin, Geologie und Materialprüfung stößt. Mit der EIT ist es möglich die Leitfähigkeit des Körpers zu bestimmen und den elektrischen Leitfähigkeitskoeffizienten darzustellen, basierend auf den Messungen, die an der Oberfläche durchgeführt wurden, ohne das Innere zu kennen.<sup>30</sup>

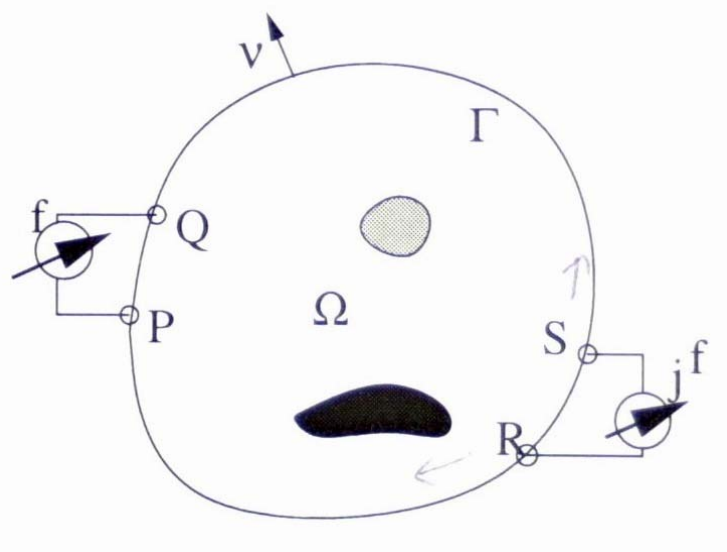
Gegeben sei ein elektrisch leitender, inhomogener Körper mit elektrischer Leitfähigkeit  $\sigma$ .<sup>31</sup> Am Rand  $\Gamma$  eines Schnitts  $\Omega$  durch einen Körper wird zwischen zwei Elektroden eine bestimmte Spannung  $f$  angelegt. Mit weiteren paarweise angelegten Elektroden misst man an verschiedenen anderen Stellen des Körpers die dort gemessenen fließenden Strom  $j^f$ , bis ausreichend viele Paare  $(f, j^f)$  erhalten wurden. Dieses Verfahren ist graphisch in *Abbildung 4* zu sehen.

---

<sup>29</sup> Vgl. MacDonald, S. 26 ff.

<sup>30</sup> Vgl. Baumeister (2001), S. 1-29.

<sup>31</sup> Da der menschliche Körper zu etwa 70% aus Wasser besteht, besitzt er eine messbare elektrische Leitfähigkeit. Diese Leitfähigkeit ist die Grundlage vieler medizinischer Mess- und Behandlungstechniken.



**Abb. 4:** Impedanztomographie

Nun gilt es mit mathematischen Methoden das inverse Randwertproblem zu lösen.<sup>32</sup> Hier stellt sich die Frage, ob die elektrische Leitfähigkeit des Körpers in der gegebenen Schicht  $\Omega$  durch die bereits ermittelten Messwerte eindeutig bestimmt ist. Ein aufzustellendes Modell hat zu klären, wie die Messwerte mit der Leitfähigkeit zusammenhängen. Es gilt nun  $\sigma : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  zu berechnen.

Angewandt wird dieses Verfahren auch in der Forstwirtschaft, etwa um Alter, Gesundheit und Beschaffenheit von Bäumen herauszufinden, ohne diese erst fällen zu müssen. *Abbildung 5* zeigt ein Bild von der Anwendung der EIT in der Forstwirtschaft.



**Abb. 5:** Elektrische Impedanz Tomographie

<sup>32</sup> Vgl. Baumeister (2001), S. 11 ff.

Auch vergrabene Landminen können damit gesucht werden. Wie beim medizinischen Verfahren werden Elektroden paarweise am Boden angelegt, zwischen denen Strom fließt. An anderen Stellen wird die elektrische Leitfähigkeit gemessen, auf Basis dessen mit Hilfe mathematischer Methoden ein Bild des Untergrunds gewonnen wird.

Vorteile: Ein Vorteil dieses Verfahrens ist, dass alle unterschiedlichen Arten von Minen auf diese Art und Weise aufgespürt werden können. Sehr gute Ergebnisse liefert es in feuchter Umgebung, etwa am Strand oder in Sümpfen, da dort die Leitfähigkeit durch die Nässe noch bessere Ergebnisse liefert. Auch das Zubehör lässt sich preiswert erwerben.

Nachteile: Der größte Nachteil ist, dass physischer Kontakt mit dem Boden vorhanden sein muss, auf diese Art und Weise könnten unbeabsichtigt Minen zur Detonation gebracht werden. Das Verfahren kann auch nicht in trockenen, nicht leitenden Gegenden eingesetzt werden. Elektrische Störungen im Boden können die Ergebnisse verfälschen. Auch die Reichweite der EIT ist auf wenige Zentimeter unterhalb der Oberfläche beschränkt. Aufgrund dieser enormen Einschränkungen wird EIT nicht zur allgemeinen Minensuche verwendet, für einige Nischen, wie etwa die Suche in feuchten Gebieten, besteht aber durchaus Einsatzpotential.<sup>33</sup>

### 4.3 Magnet Resonanz Tomographie

Die Magnet Resonanz Tomographie, kurz MRT, auch bekannt unter dem Namen Kernspintomographie, ist ein medizinisches Untersuchungsverfahren, mit dem Bilder aus dem Körperinnern gewonnen werden können.<sup>34</sup> Neben ihrem Hauptanwendungsbereich, der Medizin, werden auch auf anderen Gebieten der Wissenschaft große Fortschritte gemacht.<sup>35</sup>

Aus dem Griechischen übersetzt bedeuten „*tomo*“ und „*graphie*“ so viel wie „Schicht“ und „aufzeichnen“, weshalb sich das Wort „Tomographie“ mit „Schichtaufzeichnung oder -untersuchung“ erklären lässt. Der untersuchte Körperabschnitt lässt sich bei der Kernspintomographie optisch in Längs- oder Querschichten zerlegen, die einzeln begutachtet werden können. Obwohl die namentliche Ähnlichkeit zur „Computertomographie“ gegeben ist, basiert diese Art von Tomographie auf ganz anderen Verfahren. Es

---

<sup>33</sup> Vgl. MacDonald (2003), S. 22 ff.

<sup>34</sup> Im englischsprachigen Raum ist diese Methode unter dem Namen „Magnetic Resonance Imaging (MRI)“ bekannt. Vgl. Meyer (2003).

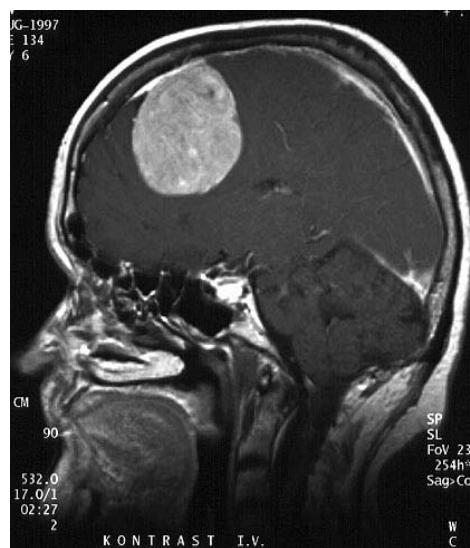
<sup>35</sup> Vgl. van Kaick (2003).



werden keine Röntgenstrahlen zur Gewinnung von Bildern des Körperinneren genutzt, sondern ein starkes Magnetfeld.

Der Patient wird einem Magnetfeld ausgesetzt, das 10.000- bis 30.000-mal stärker ist als das der Erde. Normalerweise sind die Wasserstoffatomkerne im Körper ungeordnet, durch die Einwirkung des MRT-Magnetfeldes werden sie jedoch in eine Richtung gebracht. Sie verhalten sich ähnlich Eisenspänen unter einem gewöhnlichen kleinen Magneten.<sup>36</sup> Wird eine Art von Radiowellen auf die geordneten Protonen gerichtet, nehmen sie diese Energie auf und werden von ihrer Ausrichtungsachse gemäß dem Magnetfeld abgelenkt. Nach Abschalten der externen Quelle kehren die Protonen in ihre Ausgangsposition zurück und geben dabei die aufgenommene Energie in Form schwacher Radiowellen wieder ab. Diese Signale werden von einer empfindlichen Antenne aufgefangen und durch ein computergestütztes Rechenverfahren in ein Bild umgesetzt.

Der menschliche Organismus besteht zu mehr als 70 Prozent aus Wasser ( $H_2O$ ), einer Verbindung von Wasserstoff ( $H$ ) und Sauerstoff ( $O$ ). Wasserstoff ist das überwiegende Element im Körper. Es gibt genug Wasserstoffkerne und damit Protonen, die „magnetisiert“ werden können. Je lockerer ein Körpergewebe ist, desto mehr Wasser und Wasserstoff enthält es. Besonders wasserstoffreich sind Weichgewebe, besonders wasserstoffarm sind Knochen. Im Gegenteil zur Röntgenuntersuchungen lassen sich mit der MRT Weichteile besonders gut voneinander abgrenzen. Diese werden entsprechend ihrem Wasserstoffgehalt in verschiedenen Graustufen dargestellt, wie in *Abbildung 6* zu sehen ist.



**Abb. 6:** Magnet Resonanz Tomographie

---

<sup>36</sup> Vgl. van Kaick (2003).

Dieses Verfahren kann auch im Zusammenhang mit der Landminendetektion angewandt werden. Hier wird der Boden einer Art Magnet Resonanz Tomographie unterzogen. Vor den ersten Einsätzen steht jedoch noch eine längere Entwicklungsphase bevor, in der unter anderem Vor- und Nachteile des Verfahrens erkannt werden sollen.<sup>37</sup>

#### 4.4 Bildgewinnung durch Berührung

Die Haut gibt dem Menschen die Fähigkeit, Berührungen, Druck, Spannung und Temperaturunterschiede wahrzunehmen. Die Rezeptoren für diese Empfindungen liegen in der Oberhaut und in der Lederhaut.<sup>38</sup>

Vergleichbar damit - auf technischer Computer-Ebene - sind die so genannten Touchsensoren der MindStorms-Roboter von LEGO.<sup>39</sup> Ein Exemplar ist in *Abbildung 7* zu sehen. Auf Basis der so ermittelten neuen Informationen können sich die selbstgebauten Roboter ein Bild von dem Raum machen und sich problemlos in ihrer Umgebung umherbewegen. Einem Zusammenstoßen mit der Wand kann so vorgebeugt werden.



**Abb. 7:** Touchsensor eines MindStorms-Roboter von LEGO.

Der Fertigroboter Cyé der Firma PROBOTICS eignet sich ebenfalls dazu, seine Umgebung so exakt zu erkunden, dass er danach herumrollen kann. Die Aufgabe des zweirädrigen Roboters ist es, sein Umfeld auf einer Karte zu markieren, die ihm anschließend als Grundlage für weitere Fahrten dient. Sobald Cyé eigenständig anfängt das Gebiet zu erkunden, trägt er Hindernisse und die Flächen ein, in denen er problemlos fahren kann. Allerdings nutzt er keine Sensorik, weder Kameras noch Berührungssensoren. Er misst anhand der Drehungen seiner beiden Räder Wege und Richtungen<sup>40</sup> und macht sich auf diese Art ein Bild von seiner Umgebung. Wobei das gewonnene Bild in diesem Fall nur zweidimensional ist.

---

<sup>37</sup> Vgl. Bayerischer Rundfunk (2003) und Kimmich (2001).

<sup>38</sup> Vgl. Hinrainer, Spitzner (2003).

<sup>39</sup> Vgl. LEGO Gruppe (2003).

<sup>40</sup> Vgl. Schult (1999) und Cyé (2003).

Vorteile: Im Gegensatz zu vielen weiteren Geräten zur Bildgewinnung sind diese Roboter vergleichsweise günstig, leicht zu bedienen, sehr handlich und vielseitig anwendbar.

Nachteile: Der Nachteil an den Verfahren mit den vorgestellten Robotern ist leicht ersichtlich: Für Spielereien lassen sie sich bestens nutzen, aufgrund der Ungenauigkeit der Messungen können so jedoch keine zuverlässigen Daten über die Umgebung gewonnen werden. Insbesondere im Bereich der Minendetektion ist aber genau das eine der Hauptanforderungen an die gewonnenen Bilder. Geht man davon aus, dass die Touchsensoren in ausreichender Vielzahl an allen Stellen des MindStorm-Roboters angebracht sind und so jeden Kontakt mit der Wand sofort realisieren, gibt es noch weitere Herausforderungen. Dreidimensionale Räume, unterschiedliche Höhen des Raums, Verwinkelungen oder Hindernisse bilden die nächste Schwierigkeit. Weiterhin besteht das Problem, dass Minen meist vergraben sind und mit den oben vorgestellten Methoden gar nicht erkannt werden können. Falls die Minen aber nun doch oberhalb der Erdoberfläche liegen, könnte es passieren, dass die der Bildgewinnung dienende Berührung die Detonation auslösen könnte. In realer Minenumgebung wurden solche Roboter allerdings noch nicht getestet.

## 5 Verfahren mit Elektromagnetischen Wellen

In diesem Kapitel werden vier verschiedene Verfahren zur Bildgewinnung auf Basis von elektromagnetischen Wellen vorgestellt. Es wird auf die Besonderheiten der Wellenlängen eingegangen, auf ihre Anwendung im herkömmlichen Sinne, aber auch auf ihren Einsatz bei der Landminendetektion.

### 5.1 Röntgen-Verfahren<sup>41</sup>

Der Name für die Strahlen, die eine sehr geringe Wellenlänge haben, geht auf ihren Entdecker WILHELM CONRAD RÖNTGEN zurück, der die bis dahin unbekannt Strahlen am 8. November 1895 in Würzburg entdeckte.<sup>42</sup> Zunächst wurden sie ihrer Unbekanntheit wegen X-Strahlen getauft, später aber innerhalb des deutschen Sprachraums nach ihrem Entdecker benannt<sup>43</sup>, der für diese Entdeckung am 10. Dezember 1901 den ersten Nobelpreis der Physik erhielt.

Mit Hilfe der Röntgenstrahlen können Teile des menschlichen Skeletts direkt abgebildet werden. Während die Strahlen von Knochen weitgehend absorbiert werden, durchdringen sie Weichteilgewebe und Muskeln, so dass der Unterschied gut sichtbar wird.<sup>44</sup> Die Entdeckung der Strahlen löste eine gewaltige Faszination aus: Fotografien von sonst nicht sichtbaren Strukturen im Inneren eines lebenden menschlichen Körpers waren möglich. Aber nicht nur in der Medizin fanden die Strahlen großen Anklang. 1896 fertigte RÖNTGEN eine Aufnahme vom Inneren seines Jagdgewehres an und demonstrierte so, dass man mit der Röntgenstrahlung auch in metallische Gegenstände sehen kann.<sup>45</sup> Zerstörungsfreie Materialprüfung ist möglich: Noch heute werden Schweißnähte von Rohren in Kernkraftwerken geröntgt, um winzige, von außen nicht sichtbare Risse und Hohlräume zu entdecken. Auf Flughäfen werden Röntgengeräte von Sicherheitsbeamten dazu genutzt, einen Blick in verschlossene Koffer und Taschen zu werfen.

---

<sup>41</sup> Vgl. Shirvanian (2003) für detaillierte Informationen über das Röntgenverfahren im Zusammenhang mit der Landminendetektion.

<sup>42</sup> Vgl. Lossau (1995), S. 8.

<sup>43</sup> „Der Anatom Albert von Koelliker machte bei der ersten öffentlichen Demonstration der neuen Strahlen 1896 den Vorschlag, sie nach ihrem Entdecker *Röntgenstrahlen* zu nennen.“ [Quelle: Lossau (1995), S. 13]

<sup>44</sup> „Während die Pioniere der Röntgentechnologie an mögliche biologische Nebenwirkungen gar nicht dachten, ist heute bekannt, dass die Strahlen nicht ganz ungefährlich sind. Sie verursachen unter anderem Krebs, insbesondere Leukämie, und sogar Erbgutschäden.“ [Quelle: Lossau (1995), S. 39]

<sup>45</sup> Vgl. Lossau (1995), S. 21 und S. 44.

Eine moderne Röntgenröhre ist folgendermaßen aufgebaut: Eine Glühwendel, die Kathode der Röhre, ist mit dem negativen Pol einer Hochspannungsquelle verbunden.<sup>46</sup> Die aus der heißen Kathode austretenden energiereichen Elektronen schlagen Elektronen aus den innersten Schalen der Atome des Anodenmaterials. Diese Lücken nehmen entweder Elektronen aus höheren Energieniveaus oder "freie" Elektronen ein. Da die Bindungsenergie der innersten Elektronenniveaus sehr groß ist, entsteht dabei kein Licht, sondern so genannte charakteristische (diskrete) Röntgenstrahlung mit einer festen diskreten Energie, die so genannte „Röntgenbremsstrahlung“.<sup>47</sup>

Diese Strahlen verlassen das Vakuum der Röhre nur durch ein Strahlenfenster aus Beryllium. Dieses Leichtmetall lässt Röntgenstrahlung hindurch. Die auf diese Art erzeugten Strahlen können genutzt werden, einen Menschen zu durchleuchten. Befindet sich hinter der Person ein Röntgenfilm, so erhält man eine Aufnahme, auf der solche Strukturen des Körpers zu sehen sind, die Röntgenstrahlen absorbieren, wie etwa Knochen, wie in *Abbildung 9* zu sehen ist.<sup>48</sup>



**Abb. 9:** Röntgenbild

Auch in der Minensuche wird das Röntgenverfahren eingesetzt. Hier ergibt sich das Problem, dass Landminen in der Regel im Erdboden vergraben sind und so kein Röntgenfilm hinter ihnen angebracht werden kann. Das Verfahren der so genannten Röntgenstrahlen-Rückstreuung (X-Ray Backscatter) hilft hier weiter.<sup>49</sup> Aufgrund der geringen Wellenlänge der Röntgenstrahlen ist es prinzipiell möglich, Minen-Bilder mit hoher Qualität zu gewinnen. Dieses Verfahren nutzt die Tatsache aus, dass Minen und Boden unterschiedliche Atomkennziffern haben, die sich um etwa den Wert zwei unterscheiden.

Es gibt zwei Basis-Ansätze, die die Rückstrahlung der Röntgenstrahlen nutzen um vergrabene Minen zu finden. Bei dem einen Verfahren werden die Röntgenstrahlen dafür verwendet, gebündelte Strahlen zu erzielen, die auf den Erdboden gerichtet werden und ein Bild produzieren. Bei diesem sehr aufwendigen Bündelungsprozess wird die Anzahl

<sup>46</sup> Vgl. A Med-World AG (2003).

<sup>47</sup> Vgl. A Med-World AG (2003).

<sup>48</sup> Vgl. Lossau, „Röntgen“, S. 15.

<sup>49</sup> Vgl. MacDonald (2003), S. 23.

der Photonen, die für die Herstellung des Bildes benötigt werden, drastisch reduziert. Aus diesem Grund werden zusätzlich noch energiereiche Röntgengeneratoren benötigt um weitere Photonen zu produzieren. Die Geräte sind dementsprechend groß, schwer und unhandlich, so dass es unmöglich für eine einzige Person ist, damit, wie etwa mit einem Minendetektor, zu Fuß das Feld abzusuchen. Da beim Auftreffen der Elektronen auf die Anode neben der erwünschten Röntgenstrahlung zusätzlich noch Wärmeenergie entsteht<sup>50</sup>, werden große Transportfahrzeuge benötigt, die noch für die geeignete Kühlung sorgen.

Zum anderen gibt es solche Methoden, die auf ungebündelten Röntgenstrahlen basieren. Mit ihnen wird eine weite Fläche bestrahlt. Anschließend werden mit einem speziellen Filter die vom Boden reflektierten Strahlen gemessen. Die dafür geeigneten Geräte sind im Gegensatz zu anderen von einem einzelnen Menschen tragbar.

Vorteile: Allgemein gilt, je geringer die Wellenlänge ist, desto detaillierter wird das Bild. Bei der niedrigen Wellenlänge der Röntgenstrahlen ergeben sich deshalb sehr genaue Bilder, auf denen teilweise sogar der Minentyp bestimmt werden kann. So kann schon vor dem Entschärfen der Mine schon alles Notwendige in die Wege geleitet werden, die Sprengstoffexperten wissen bereits vorher, womit sie es zu tun haben und welche Besonderheiten sie gegebenenfalls erwarten.

Nachteile: Es ist unmöglich, Gegenstände zu erkennen, die tiefer als etwa zehn Zentimeter im Boden liegen. Nicht zu vernachlässigen ist auch die mögliche gesundheitliche Gefahr für die Person, die den Detektor hält beziehungsweise ihm am nächsten steht. Aufgrund der geringen Wellenlänge kann eine ständige Röntgenbestrahlung durchaus gesundheitsschädlich sein.

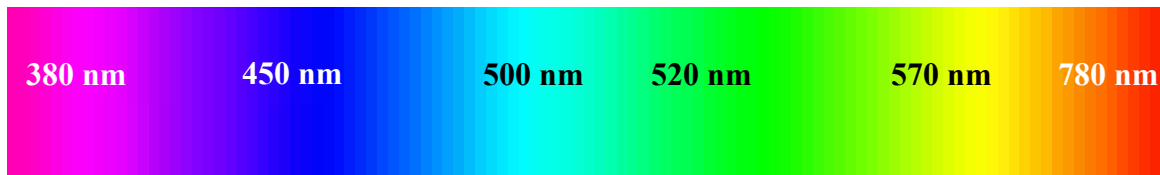
## 5.2 Sichtbares Licht

Der Bereich des sichtbaren Lichts erstreckt sich in *Abbildung 10* über ein Farbspektrum von Violett bis Rot, wobei Violett die Farbe mit der geringsten, grade noch für den Menschen erkennbaren Wellenlänge (380 Nanometer) ist. Rot dagegen hat die größte Wellenlänge (780 Nanometer) und somit die geringste Frequenz, die der Mensch ohne Hilfsmittel erkennen kann. Dazwischen liegen fortschreitend die Wellenlängen für Blaues, Grünes, Gelbes und Oranges Licht.<sup>51</sup>

---

<sup>50</sup> Dies geschieht etwa im Verhältnis 1 : 100.

<sup>51</sup> Vgl. Encarta, „Licht“.



**Abb. 10:** Frequenzen

Farbe erscheint dem Mensch nur aufgrund des unterschiedlichen Verhaltens der Wellenlängen beim Auftreffen auf einen Gegenstand. Werden alle Wellen des sichtbaren Bereichs in gleicher Intensität von diesem reflektiert, vermischen sich diese unterschiedlichen Wellenlängen und erscheinen für den Betrachter als weiße Farbe. Die Helligkeit hängt hierbei von der gesamten Intensität ab. Werden alle Wellenlängen dagegen von dem jeweiligen Objekt absorbiert, so erscheint das Objekt schwarz. Bei besonderen Gegenständen, wie etwa bei Glas oder klarem Wasser, werden diese Wellen transmittiert, also nicht aufgehalten oder reflektiert, sondern durch den Gegenstand durchgelassen.

Bilder werden in diesem Bereich des elektromagnetischen Spektrums mithilfe einer Kamera aufgenommen, einem „Gerät zur photographischen Abbildung der sichtbaren Wirklichkeit, die durch Lichtwellen repräsentiert wird.“<sup>52</sup> Die Geschichte der Kamera ist alt: Bereits ARISTOTELES kannte etwa 300 Jahre v. Chr. die Grundzüge für ein frühes Modell der photographischen Abbildung. Die „camera obscura“ (lat. „dunkler Raum“) bildete als so genannte Lochkamera die technische Grundlage für die spätere Erfindung des Fotoapparats. Aber erst im 18. Jahrhundert gelang es NIEPCE<sup>53</sup>, das photographische Abbild mit Hilfe einer lichtempfindlichen Schicht mehr oder weniger dauerhaft zu konservieren.<sup>54</sup>

Das Wort „Photographie“ stammt von den Griechischen Wörtern „phos“ und „graph-ein“ ab und bedeutet so viel wie „Licht“ und „schreiben“: Photographie ist die Technik, mit Hilfe von chemischen oder elektronischen Verfahren ein Bild herzustellen.<sup>55</sup> Die Wellen werden von einer Glaslinse, dem so genannten Objektiv aufgefangen und anschließend in einem chemischen oder elektronischen Prozess dauerhaft fixiert.<sup>56</sup>

Verwendet man nun Wellenlängen im Bereich des sichtbaren Lichts zur Minensuche, stößt man auf einige Probleme. Landminen gibt es zum größten Teil in „Tarnfarben“, die sich schlecht vom Untergrund abheben und somit für das menschliche Auge und auch für eine normale Fotokamera schwer zu erkennen sind. Dies geht aus *Abbildung 11*

<sup>52</sup> Vgl. Encarta, „Kamera“.

<sup>53</sup> „Niepce, Joseph Nicéphore (1765-1833), französischer Erfinder und Pionier der Photographie, der das erste beständige Lichtbild erzeugte.“ [Quelle: Encarta, „Niepce“]

<sup>54</sup> Vgl. Encarta, „camera obscura“.

<sup>55</sup> Vgl. akademie.de asp GmbH (2003).

<sup>56</sup> Vgl. Encarta, „Kamera“.

hervor. Im Gegensatz dazu gibt es auch Streu- oder Clusterbomben, die bis zu 200 kleine Sprengsätze enthalten. Ihre Eigenart besteht darin, dass sie im Anflug aufplatzen, ihre Sprengsätze über weite Gebiete verstreuen, die direkt explodieren und so ganze Gegenden verminen. Etwa zehn Prozent der Sprengsätze bleiben jedoch als Blindgänger liegen und fungieren so die nächsten Jahre als Landmine. Diese lassen sich aufgrund ihrer leuchtenden Farbe leicht vom Boden abgrenzen, wie in *Abbildung 12* erkennbar ist, die Farbe bedeutet gleichzeitig aber auch Gefahr. Sie wirkt anziehend auf Kinder und so kam es schon zu folgenschweren Verwechslungen. Auch mit ähnlich aussehenden Lebensmittelpaketen, die in den Kriegen in Afghanistan und im Irak abgeworfen wurden, wurden die Sprengsätze schon verwechselt.<sup>57</sup>



**Abb. 11:** Landmine



**Abb. 12:** Clustermine

Vorteile: Der Vorteil bei diesem Verfahren ist leicht ersichtlich: Mit Hilfe von Kameras mit hoher Auflösung ist kein physischer Kontakt zum Minenfeld mehr notwendig. Bilder können aus einem Flugzeug gewonnen werden, die nötige Sicherheit ist so gegeben. Weiterhin sind mit den Wellenlängen im Bereich des für den Menschen sichtbaren Lichts auch Farbunterschiede sichtbar, Schriften können so gegebenenfalls erkannt werden.

Nachteile: Bilder können nur bei Licht gewonnen werden. Dabei muss das Licht nicht notwendigerweise Sonnenlicht sein, es kann auch von einer künstlichen Quelle stammen. Minenfelder verfügen im allgemeinen über eine gewisse Größe, daher ist die vollständige Beleuchtung vom Aufwand her nicht die günstigste Lösung. Der größte Nachteil besteht jedoch darin, dass das ganze Verfahren sinnlos wird, sobald die Landminen auch nur einen Zentimeter unter der Erdoberfläche liegen. Mit diesem Verfahren kann

---

<sup>57</sup> Vgl. terre des hommes (2003).



dann keine Mine – egal welcher Größe und Form – mehr erkannt werden. Auch auf einem Minenfeld mit starker Vegetation erzielt dieses Verfahren keine guten Ergebnisse. Oberflächenminen werden auf Grund des starken Bewuchses oder anderen Gegenständen überdeckt und sind so nicht sichtbar.

Oftmals ist es aber gar nicht die Zielsetzung, ausnahmslos alle Minen auf diese Weise zu finden, sondern lediglich hinreichend genau ein mögliches Minenfeld einzugrenzen. Nach den Minen gesucht wird dann vor Ort mit detaillierten Verfahren.

### 5.3 Infrarot-Verfahren

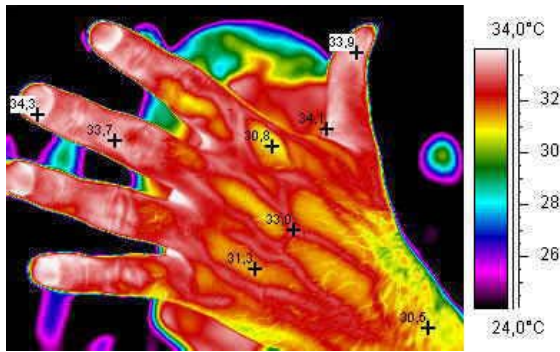
Die Wellenlänge der elektromagnetischen Infrarotstrahlung ist etwas größer als die des sichtbaren roten Lichtes und hat eine Größe zwischen  $10^{-6}$  und  $10^{-3}$  Meter. Die Infrarotstrahlung wurde zu Beginn des 19. Jahrhunderts von dem Astronomen HERSCHEL<sup>58</sup> entdeckt. Er wies diese Strahlung aufgrund ihrer Wärmewirkung nach. Mit ihrer Hilfe lassen sich auch Bilder von sehr weit entfernten Gegenständen oder Objekten aufnehmen. So wird in der Astronomie der infrarote Teil des Spektrums von Sternen und Nebeln untersucht, die kaum sichtbares Licht emittieren. Die Infrarotphotographie ist eine wichtige Untersuchungs- und Aufklärungsmethode in der medizinischen Diagnostik sowie in der Landwirtschaft und Industrie. Infrarotaufnahmen lassen krankhafte Veränderungen an Geweben und Organen erkennen, die im normalen Licht oder auf Röntgenbildern nicht erkennbar sind.<sup>59</sup> Auch im Rahmen der Raumüberwachung wird die Infrarotphotographie erfolgreich eingesetzt. In *Abbildung 13* ist ein Infrarotbild der menschlichen Hand zu sehen, in *Abbildung 14* ist die Wärmeverteilung bei einem Haus abgebildet. So lassen sich etwa versteckte Baumängel und Wärmelecks frühzeitig und ohne Probleme erkennen.

Das „passive Infrarot-Verfahren“ basiert darauf, dass Wärme über weite Strecken nachgewiesen werden kann. Beim „aktiven Infrarot-Verfahren“ wird der zu untersuchende Gegenstand mit IR-Licht angestrahlt. Da IR-Strahlung von Materie absorbiert wird und diese dabei aufheizt, kann man das so erzeugte Wärmebild mit IR-Sensoren aufnehmen.

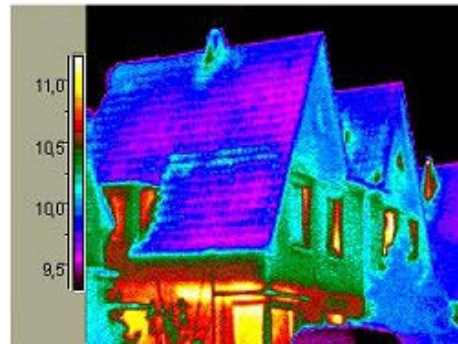
---

<sup>58</sup> „Herschel, Sir Friedrich Wilhelm (William), (1738-1822), britischer Astronom deutscher Herkunft, der bedeutende Beiträge zur Astronomie leistete.“ [Quelle: Encarta, „Herschel“]

<sup>59</sup> Vgl. Encarta, „Infrarotstrahlung“.



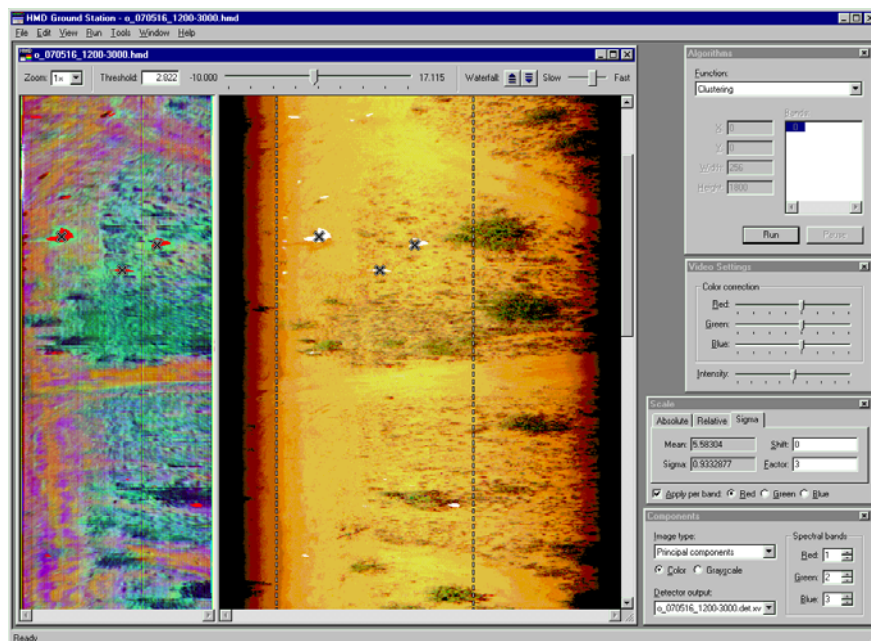
**Abb. 13:** Infrarotbild I



**Abb. 14:** Infrarotbild II

Werden diese Methoden zur Minensuche eingesetzt, werden anormale Variationen in der elektromagnetischen Strahlung von Oberflächenminen oder dem Boden und der Vegetation direkt über den vergrabenen Landminen entdeckt. Es wird grundsätzlich zwischen „Temperatur-Abhängigen“ und „Temperatur-Unabhängigen“ Verfahren unterschieden.

Erstere wird durch eine permanente Sonnenstrahlung auf das zu untersuchende Minenfeld ermöglicht. Die unter der Erdoberfläche liegenden Minen speichern die aufgenommene Wärme anders als der umliegende Boden und können auf dieser Basis von der Umgebung unterschieden werden. Um die unterschiedlichen Temperatur-Profile erkennen zu können, muss die Fläche ausreichend beleuchtet werden. Die Sichttiefe dieses Verfahrens liegt allerdings bei maximal einem Meter.<sup>60</sup>



**Abb. 15:** Minensuche – Infrarot

<sup>60</sup> Vgl. MacDonald (2003), S. 24 ff.

In *Abbildung 15* ist ein Bild zur Landminendetektion mit Hilfe des Infrarotverfahrens dargestellt, auch Hyperspectral Mine Detection (HMD) genannt. Im rechten Bereich ist ein Feldweg abgebildet, auf dem Landminen vermutet werden. Der gestrichelte Bereich ist im linken Bildausschnitt auch als Infrarotaufnahme dargestellt. Die Schaltflächen an der rechten Seite dienen dazu, die Displays zu kontrollieren und die Überwachungsalgorithmen zu kontrollieren. Im Infrarot-Bild sind solche Bereiche Rot dargestellt, die einen zuvor vorgegebenen Schwellenwert überschreiten. In dem obigen Beispiel versucht ein bestimmter Cluster-Algorithmus die Falschalarmquoten zu reduzieren, in dem er solche Stellen streicht, die zu klein für eine potentielle Landmine sind. Die Stellen, die laut Infrarot-Bild Minen darstellen könnten, sind in beiden Abbildungen mit „x“ gekennzeichnet.<sup>61</sup> Diese Stellen werden in GPS Koordinaten<sup>62</sup> konvertiert und weiter bearbeitet.

Das zweite Verfahren, das „Temperatur-Unabhängige“, deckt Boden- und Vegetationsanomalitäten auf, die ungewöhnlichen Änderungen in Elektromagnetischer Strahlung verursachen. Dies ist unvermeidbar bei vergrabenen Objekten, da die Minenumgebung Licht anders reflektiert, unabhängig von der Tatsache, ob es sich jetzt um künstliches oder natürliches Licht handelt. Bei Oberflächenminen ist dies offensichtlich: Materialien, die vom Menschen hergestellt wurden, sind im Vergleich zu natürlichen Gegenständen sehr glatt und reflektieren auch dementsprechend. Aber auch bei vergrabenen Landminen unterscheidet sich die künstlich aufgeschüttete Erde deutlich von der Umgebung.

Vorteile: Die Vorteile des Verfahrens sind ersichtlich: Es ist kein physischer Kontakt zum Minenfeld notwendig, die benötigten Fotos können vom Flugzeug aus aufgenommen werden und auch in sicherer Entfernung ausgewertet werden. Weiterhin kann man mit Weitwinkelobjektiven beim IR-Verfahren große Flächen schnell überblicken. Im Gegensatz etwa zum Röntgenverfahren ist die benötigte Ausrüstung so leicht, dass sie ohne Probleme von einer Person getragen werden kann.

Nachteile: Eingeschränkt wird das Verfahren durch die große Abhängigkeit von Wetter, Tageszeit und Umwelt. Das „Temperatur-Abhängige“ Verfahren ist aufgrund der notwendigen Wärme nur tagsüber bei ausreichendem Sonnenlicht nutzbar. Zwar könne das Minenfeld auch mit künstlichen Wärmequellen so weit erhitzt werden, dass der Unterschied im Boden auf IR-Fotos erkennbar wird, aber der Aufwand und die dadurch entstehenden Kosten sind nicht tragbar. Aus diesem Gründen ist das Verfahren nicht weit

---

<sup>61</sup> Vgl. Space Computer Corporation (2003).

<sup>62</sup> GPS ist das "Global Positioning System" der USA.

entwickelt, obwohl es bei optimalen Voraussetzungen sehr gute Ergebnisse liefert. Es wird aber ständig weiter entwickelt, und zeigt ein großes Potential für die Zukunft.<sup>63</sup>

#### 5.4 Radarverfahren

Für das Radarverfahren werden Wellenlängen mit einer Größe von ungefähr einem Zentimeter bis einem Meter genutzt. Die Abkürzung RADAR stand ursprünglich für *Radio Aircraft Detection and Ranging*, ein Verfahren, das mit Hilfe von elektromagnetischen Radiowellen Flugzeuge außerhalb des sichtbaren Bereichs entdeckt und lokalisiert. Nachdem diese Technologie jedoch in der darauf folgenden Zeit sehr verbreitet wurde, wurde die Bezeichnung in *Radio Detection and Ranging* abgeändert.<sup>64</sup> Das erste brauchbare Radarsystem zur Luftwarnung wurde 1935 von dem Radartechniker WATSON-WATT entwickelt. Dieses System war in der Lage, Flugzeuge in einer Entfernung von bis zu 60 Kilometer zu orten. Während des 2. Weltkrieges war das Radar von großer militärischer Bedeutung.<sup>65</sup>

Einer der größten Anwendungsbereiche der Radartechnik ist im militärischen Bereich zu finden. Luftraumüberwachung und Gefechtsfeldüberwachung gehören dort ebenso zu den möglichen Aufgaben wie die Flugsicherung oder die Aufklärung.<sup>66</sup> Aber auch im zivilen Bereich wird die Radartechnik zunehmend genutzt. Am bekanntesten ist der Bereich Straßenverkehr, wo das Radar zur Verkehrszählung oder -überwachung, zu Geschwindigkeitskontrollen oder auch zu Hinderniserkennung genutzt wird. Auch berührungslose Messungen an schwerzugänglichen Objekten, wie etwa Tiefenmessungen oder ähnliches, lassen sich mit dem Radargerät vereinfacht durchführen.<sup>67</sup>

Ein Radarsystem ist vergleichbar mit dem Echoprinzip: Das System sendet Funkwellen aus, die auf Objekte auftreffen und von diesen reflektiert werden. Die reflektierten Wellen, die Echos, gelangen anschließend zum Radarsystem zurück und werden dort weiterverarbeitet und auf Bildschirmen sichtbar gemacht. Ein Radarsystem besteht aus einem Sender, einer Antenne, einem Empfänger und einem Anzeigegerät.<sup>68</sup> Erfolgt am Ursprungsort eine Zeitmessung ab Beginn der Aussendung bis zum Eintreffen der Reflektion, kann so der Abstand zwischen Ursprungsort und Hindernis errechnet werden. Allgemein gilt, je mehr gleichmäßige Fläche ein Objekt hat, desto besser reflektiert es Radarwellen.

---

<sup>63</sup> Vgl. MacDonald (2003), S. 25-26.

<sup>64</sup> Vgl. Huder (1999), S. 1 ff.

<sup>65</sup> Vgl. Encarta, „Radar“.

<sup>66</sup> Vgl. Huder (1999), S. 4 ff.

<sup>67</sup> Vgl. Huder (1999), S. 4 ff.

<sup>68</sup> Vgl. Encarta, „Radar“.

Darauf basiert die so genannte Stealth-Technik bei Flugzeugen.<sup>69</sup> Es handelt sich hier um die Fähigkeit sich zu verbergen, in diesem Fall vor dem gesamten Spektrum der elektromagnetischen Strahlung. Der Nachdruck liegt auf dem Radarwellenbereich, im Infrarotbereich und im Bereich des sichtbaren Lichtes, in denen Sensor- und Suchtechniken hoch entwickelt sind. Flugzeuge werden im Bezug auf ihre Form und Lackierung also so geändert, dass von den auftreffenden Radarstrahlen nicht genug reflektiert werden, um ein klares Signal zu liefern. Zwar treffen diese auf das entsprechende Flugzeug auf, werden aber dann in alle Himmelsrichtungen gestreut, nur nicht zurück zum Empfänger.<sup>70</sup> Neben der äußerlichen Gestaltung des Flugzeuges gibt es noch die Möglichkeit, den passiven Radarschutz spürbar zu verbessern, etwa durch die Beschichtung mit Radarabsorbierenden Materialien. Die wenigen Wellen, die dennoch zurückgelangen, zeigen dann ein Radarecho an, dass etwa dem eines Vogels entsprechen könnte.<sup>71</sup>



**Abb. 16:** Stealth-Flugzeug B-2



**Abb. 17:** Stealth-Flugzeug B-2 - seitlich

Das Bomberprogramm B-2 (vgl. *Abbildungen 16* und *17*) bildet derzeit den Kern der Stealth-Entwicklung und stellt mit einem Finanzvolumen von 70 Milliarden Dollar das größte Einzelprojekt in der Rüstungsgeschichte dar. Die US Air Force stellt mit einem Stückpreis von 600 Millionen Dollar die bislang teuerste von ihr je erworbene Offensivwaffe ins Arsenal.<sup>72</sup>

Mit Radargeräten lassen sich jedoch nicht nur Flugzeuge lokalisieren, sondern auch Minen aufspüren, die unter der Erdoberfläche liegen.<sup>73</sup> Mit dem Ground Penetrating Radar (GPR) oder zu Deutsch „Bodeneindringradar“ können Radiowellen auch in den

---

<sup>69</sup> Das Wort „Stealth“ hat im Englischen eine schimmernde Bedeutung. Im Deutschen übersetzt man es am treffendsten (in Anlehnung an die Wortwurzel „steal“) mit „verstohlen“.

<sup>70</sup> Große plane Flächen wie Boden- und Seitenwände reflektieren unter verschiedenen Aufschlagwinkeln einen Radarsuchstrahl hervorragend. Aus aerodynamischen Gründen werden die Tragflächen von Flugzeugen immer leicht gekrümmte plane Flächen bleiben müssen und in der Draufsicht hervorragende Radarechos liefern. Ansonsten werden neue Stealth-Bomber konsequent in Rundungen ausgeführt. Vgl. Albrecht (2003).

<sup>71</sup> Vgl. Albrecht (2003).

<sup>72</sup> Vgl. Albrecht (2003).

<sup>73</sup> Vgl. MacDonald (2003), S.18 ff.

Boden gesendet werden. Die elektromagnetische Energie breitet sich in den Erdschichten aus und wird an der Grenzschicht unterschiedlicher Leitfähigkeit reflektiert. Das kann etwa die Grenze zwischen Boden und Mine oder zwischen Boden und Stein sein. Das reflektierte Signal wird anschließend analysiert und in ein Bild des Bodens umgewandelt.

GPR wird größtenteils für flache Erduntersuchungen zu Umweltzwecken oder für Archäologische Forschungen verwendet. Je nach verwendeter Frequenz und Beschaffenheit des Bodens ist es jedoch möglich bis zu einer Tiefe von 100 Metern in den Erdboden zu sehen. Je höher die genutzte Wellenlänge, desto tiefer gelangen die Wellen in den Boden. Gleichzeitig gilt aber auch, dass die Bildqualität mit steigender Wellenlänge stetig abnimmt. Es gilt also ein akzeptables Optimum zwischen Bildqualität und Tiefe der Untersuchung zu finden.

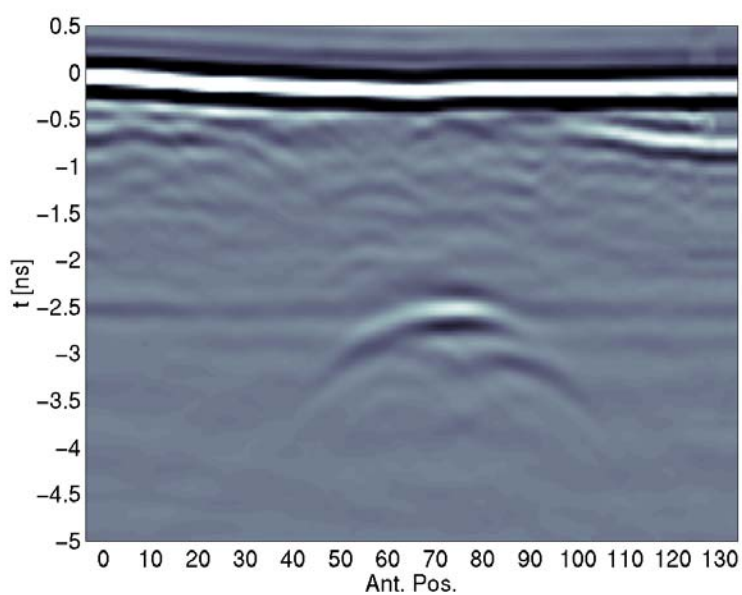
Vorteile: Der Vorteil dieses Verfahrens beruht darauf, dass GPR nicht nach Metall im Boden sucht, wie etwa die herkömmlichen Metalldetektoren, sondern nach Unterschieden im Boden. Da der Metallanteil bei modernen Minen immer geringer wird und verstärkt Plastikminen eingesetzt werden, können diese mittels GPR-Systemen gefunden werden.

Nachteile: Der Nachteil ist, dass GPR von Oberflächeninhomogenitäten abgelenkt wird und so Signale gibt, die letztendlich nur vergrabene Steine darstellen. So entstehen relativ hohe Falsch-Alarm-Quoten bei dem Verfahren.

Die Ohio State University (OSU) beschäftigt sich seit den 70er Jahren damit, geeignete Radarsysteme zu entwickeln, um so Landminen zu entdecken und zu klassifizieren. Insbesondere Anti-Panzerminen standen im Mittelpunkt ihrer Untersuchungen. Mit einem neu entwickelten System lassen sich gute Ergebnisse bezüglich Minendetektion erreichen, insbesondere für solche Minen, die in unreinem und inhomogenem Untergrund verborgen sind. In den folgenden *Abbildungen 18* und *19* sind Darstellungen vergrabener Minen zu sehen, die mit dem GPR-Verfahren gewonnen wurden. In *Abbildung 18* ist eine in etwa 15 Zentimeter Tiefe vergrabene Mine dargestellt. Es handelt sich hierbei um eine „M15“, eine Anti-Panzermine aus Metall mit einer Breite von etwa 34 Zentimeter und einer Höhe von gut 13 Zentimeter. Sie enthält über zehn Kilogramm Sprengstoff.<sup>74</sup>

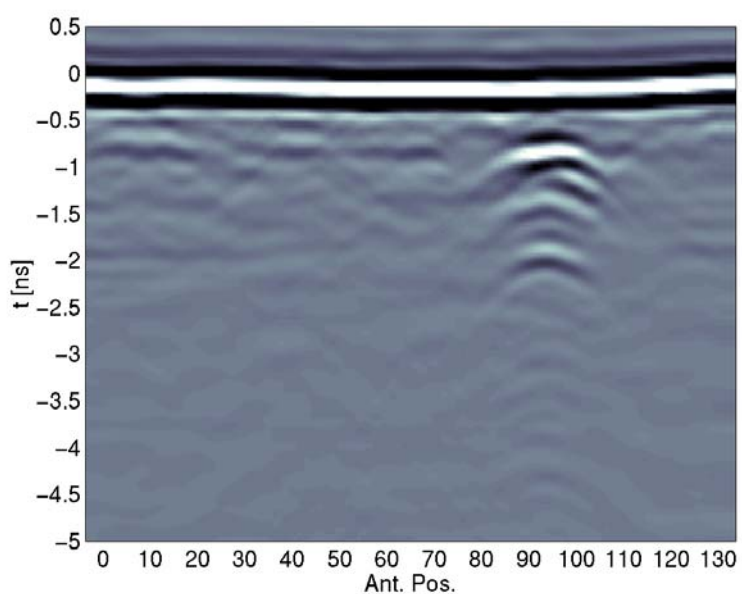
---

<sup>74</sup> Vgl. Engelhardt (2003).



**Abb. 18:** Anti-Panzer-Mine - 15 cm tief

In *Abbildung 19* handelt es sich um eine „Val69“, eine metallische Anti-Personenmine, die in etwa fünf Zentimeter Tiefe vergraben ist. Die Mine ist knapp neun Zentimeter breit und etwa zehn Zentimeter hoch.<sup>75</sup>



**Abb. 19:** Anti-Personen-Mine - 5 cm tief

<sup>75</sup> Vgl. Howe et al. (2000).

## 6 Vergleich der Verfahren

Im Folgenden sollen die bisher vorgestellten Verfahren miteinander verglichen werden, abhängig davon, welche Stärken und Schwächen sie in verschiedenen Bereichen vorweisen. Verglichen werden Radar-, Infrarot- und Röntgenverfahren, sowie Verfahren mit sichtbarem Licht und akustische Verfahren. All diese Verfahren haben unterschiedliche Vor- und Nachteile. Der Übersichtlichkeit halber werden diese jetzt noch einmal miteinander verglichen. Je nach Schwerpunkt der Suche kann dann auf ein in diesem Bereich spezialisiertes System zurückgreifen.

Während die Verfahren, die auf großen Wellenlängen basieren, die Bilder des Bodens auch aus weiter Entfernung gewinnen können, ist es beim Röntgenverfahren notwendig die Strahlen nahe am Boden auszusenden. Die dadurch resultierende Gefahr ist verständlich: Bei einer Fehlinterpretation der gewonnenen Daten hätte die weitere Fortbewegung mit dem Einsatzgerät die Auslösung zur Folge. Ebenso wie früher die Suche mit einem Metalldetektor ist das Risiko für die Einsatzkräfte entsprechend hoch.

Nicht zu unterschätzen ist auch die potentielle gesundheitliche Gefahr, die von den jeweiligen Einsatzgeräten ausgeht. Während die langwelligen Radar- oder Infrarotstrahlen für den Menschen ungefährlich sind, können die kurzwelligen Röntgenstrahlen bei permanenter Bestrahlung akute Hautschäden in den unterschiedlichsten Formen hervorrufen.

Bei der Aufnahmedauer schneidet das Röntgenverfahren ebenfalls nicht gut ab. Für einen untersuchten Quadratmeter braucht es mehrere Minuten. Auch die akustischen Verfahren benötigen pro Quadratmeter bis zu einer Viertelstunde Untersuchungszeit. Hierbei kann Abhilfe geschaffen werden, indem mehrere Sensoren gleichzeitig verwendet werden, die verschiedene Tiefen des Bodens untersuchen oder parallel zueinander arbeiten, so dass der Vorgang beschleunigt werden kann. In Bereichen des sichtbaren oder des infraroten Lichts können detaillierte Fotos von einer weiten Umgebung innerhalb von kurzer Zeit gewonnen werden.

Die unterschiedlichen Verfahren reagieren auch anders auf die Umwelt. Während Radar- und Röntgenverfahren mit keinem allzu extremen Wetter Probleme haben, reagieren die anderen ganz unterschiedlich. Infrarote Bilder nehmen bei konstantem Schnee- oder Regenfall an Qualität und Informationen ab. Ebenso verfälschen fremde Hitze- oder Kältequellen das gewonnene Bild. Bilder im Bereich des sichtbaren Lichts können nur bei Licht gewonnen werden, sei es bei natürlichem Sonnenlicht oder mit Hilfe von künstlichen Lichtquellen. Nebel, Regen oder Schnee beeinträchtigen die Qualität des Ergebnisses. Auch akustische Verfahren sind abhängig von ihrer Umwelt, bei starkem



Frost und daraus resultierendem gefrorenen Boden gelangen die Schallwellen nicht in den Erdboden und das Verfahren kann so keine brauchbaren Ergebnisse liefern.

Je nach Verfahren gibt es auch unterschiedliche Hindernisse, mit denen diese konfrontiert werden. Beim Radarverfahren führen natürliche Gegenständen oder Inhomogenitäten an der Oberfläche zu Fehlalarm, beim akustischen Verfahren sind es vergrabene hohle Gegenstände, die diesen auslösen. Das Röntgenverfahren gelangt bei stark uneinheitlichem Boden an seine Grenzen Es ist dort nicht mehr möglich, das Gerät einzusetzen. Akustische Verfahren haben Probleme mit einem gefrorenen Boden.

Interessant ist die Tatsache, dass der Mensch von dem weiten Elektromagnetischen Spektrum nur in einer Breite von wenigen Hundert Nanometern Farben erkennen und so gegebenenfalls Schriften lesen kann. Im Bereich außerhalb des Sichtbaren Lichts lassen sich nur – beispielsweise durch das Röntgenverfahren – reliefartige Unterschiede im Material erkennen. Einfache Beschriftungen oder sonstige Farbunterschiede lassen sich sonst jedoch nirgends erkennen.

Sehr unterschiedliche Ergebnisse erreichen die Verfahren im Bezug auf die Messtiefe. Während man mit dem GPR unter gewissen Voraussetzungen bis zu 100 Meter tief in den Bodensehen kann, reicht das Röntgenverfahren nur wenige Zentimeter tief. Auch mit akustischen Verfahren können Minen unterhalb von einem Meter kaum noch lokalisiert werden.

Bezüglich Genauigkeit liefert das Röntgenverfahren aufgrund der niedrigen Wellenlänge die besten Ergebnisse. Es ist unter Umständen sogar möglich, die vergrabene Mine von der Oberfläche aus zu erkennen und zu klassifizieren. Überboten wird diese Detaillierung nur noch vom sichtbaren Licht des Spektrums, unter der Voraussetzung, dass die Mine nicht vergraben ist. Das Infrarotverfahren liefert keine Details, unter Umständen jedoch einen Umriss des vergrabenen Gegenstandes. Auch beim Einsatz des GPR-Verfahrens wird nur angezeigt, ob sich ein Gegenstand im Boden befindet oder nicht.

Auch anhand der Fehlalarm- und Erfolgsquoten kann man ein Verfahren bewerten. Während sich früher bei der Minensuche mit Metalldetektoren die Erfolgsquoten durchaus sehen lassen konnten, störte dort jedoch die ebenfalls hohe Fehlalarmquote. Jeder im Boden vergrabene Schrott, wie etwa alte Getränkedosen, wurde angezeigt und musste dann unter größten Vorsichtsmaßnahmen ausgegraben werden. Auch beim GPR ist eines der größten Probleme die Tatsache, dass das Verfahren sich schnell von Oberflächeninhomogenitäten ablenken lässt und dementsprechend falsche Ergebnisse liefert. Demgegenüber sind die Fehlalarmquoten beim Röntgenverfahren relativ gering. Oft kann bereits oberhalb des Erdbodens bestimmt werden, worum es sich bei dem vergra-

benen Gegenstand handelt. Auch mit akustischen Verfahren werden niedrige Falschalarmquoten erzielt bei gleichzeitig bei hohen Erfolgsquoten.

Ein optimales Minensystem sollte eine große Fläche, also mehrere tausend Quadratmeter untersuchen können – und das schnell, sicher und zuverlässig. Es soll möglichst alle unterschiedlichen Minensorten und Variationen erkennen und unterscheiden können.<sup>76</sup> Keins der vorgestellten Verfahren ist jedoch alleine dazu in der Lage. Allerdings lässt sich aus den unterschiedlichen Verfahren nun ein Verfahren entwickeln, dass all die unterschiedlichen Vorteile nutzt und so die Nachteile kompensiert. Ein so genanntes Multisensorensystem dient dazu, mit hoher Erfolgsquote und niedriger Fehlalarmquote in den unterschiedlichsten Bodenarten Minen zu finden.

---

<sup>76</sup> Vgl. MacDonald (2003), S.193.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Seminararbeit wurde ein grober Überblick über die unterschiedlichsten Verfahren zur Bildgewinnung gegeben. Im Mittelpunkt standen Bildgewinnungsverfahren die auf unterschiedlichen elektromagnetischen Wellenlängen beruhen, wie das Radar-, Infrarot- und Röntgenverfahren, sowie die Bildgewinnung mit Hilfe einer herkömmlichen Fotokamera. Im fünften Kapitel wurden diese in Bezug auf Entwicklung und Anwendung im Bereich Bildgewinnung erklärt. Aber auch bildgebende Verfahren, die ohne elektromagnetischen Wellen auskommen, wurden kurz vorgestellt. Diese vorgestellten Möglichkeiten wurden anhand spezifischer Vor- und Nachteile miteinander verglichen, einige geeignete Anwendungsmöglichkeiten wurden im sechsten Kapitel herausgearbeitet.

Das Hauptziel für die weitere Forschung bezüglich Bildgewinnung und Landminendetektion ist es, den Fehlalarm der einzelnen Verfahren beziehungsweise des Multisensorsystems zu senken und gleichzeitig die Erfolgsquote zu erhöhen. Insbesondere die Kombination von unterschiedlichen Sensoren in einem so genannten Multisensorgerät erscheint viel versprechend. Diese Geräte sind entsprechend komplizierter und teurer als etwa die einfachen Metalldetektoren. Ein sich zusätzlich ergebendes Problem bei der Minensuche ist, dass Suchgeräte die als Sensor Kupferspulen enthalten oder als Trägermaterial Metall, induktiv arbeitende Zünder auslösen können.

Die Anforderungen an die neuen Geräte für die zivile Minenräumung sind sehr streng. Im Gegensatz zum Militär, das sich im Kampfeinsatz mit Räumraten von etwa 80 Prozent zufrieden gibt, muss die zivile Räumung vollständig sein. Hier gilt als empirischer Toleranzwert bei Kombination unterschiedlicher Methoden eine Räumrate von annähernd 99,6 Prozent. Ein durch Minen verödetes Gebiet wird nur dann wieder bewohnt und beackert, wenn die Menschen darauf vertrauen können, dass dort wirklich keine Mine mehr liegt. Eine einzige Explosion kann das Vertrauen der Menschen schwer erschüttern, so dass diese das Gebiet erneut verlassen und alle Räumarbeiten damit vergeblich waren.<sup>77</sup>

---

<sup>77</sup> Vgl. Westdeutscher Rundfunk (2003).

## Literaturverzeichnis

- A Med-World AG: Röntgenstrahlung. 2003. <http://www.m-ww.de/enzyklopaedie/strahlenmedizin/roentgenstrahlung.html> Abrufdatum: 2003-12-27.
- akademie.de asp GmbH. Bild. 2003. <http://www.net-lexikon.de/Bild.html>. Abrufdatum: 2003-12-15.
- akademie.de asp GmbH. Fotografie. 2003. <http://www.net-lexikon.de/Fotografie.html> Abrufdatum: 2003-12-15.
- akademie.de asp GmbH. Mine (Waffe). 2003. <http://www.net-lexikon.de/Mine-Waffe.html> Abrufdatum: 2003-12-15.
- Albrecht, U.: Die Stealth – Technik. 2003. <http://home.t-online.de/home/Nightowl-FXS/Stealth.htm> Abrufdatum: 2003-12-15.
- Albrecht, U.: Stealth – die neue Wunderwaffe? 2003. <http://www.uni-muenster.de/PeaCon/wuf/wf-89/8911000m.htm> Abrufdatum: 2003-12-15.
- Baumeister, J.: Bilder und bildgebende Verfahren. Frankfurt/Main. 2001.
- Bayerischer Rundfunk: Neuentwickelte Technik: Einsatz von Tomographen zur Minen-Entschärfung. 2003. <http://br.ee.fhm.edu/brhoerfunk/0100.html> Abrufdatum: 2003-12-15.
- Cye. The first Personal Robot. 2003. <http://www.personalrobots.com/>. Abrufdatum: 2003-12-27.
- Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG. dtv-Lexikon – Ein Konversationslexikon in 20 Bänden. München. 1972.
- Engelhardt, A.: Minen. 2003. <http://www.military-info.de/Foto/minen.htm> Abrufdatum: 2003-12-15.
- Federation of American Scientists: Mine Neutralization. 1999. [http://www.fas.org/man/dod-101/sys/ship/weaps/mine\\_sweep.htm](http://www.fas.org/man/dod-101/sys/ship/weaps/mine_sweep.htm) Abrufdatum: 2003-12-15.
- Gliet, J.; Pieke, B.; Kritzler, M.; Schreiber, T.: Bildaufbereitung für die Objekterkennung. 2003. Seminar zum Thema „Unterstützung von Landminendetektion durch Bildauswertungsverfahren und Robotereinsatz“ an der Westfälischen Wilhelms-Universität.
- Günther, R.W.: Grundlagen der Röntgendiagnostik. 2003. <http://www.rad.rwth-aachen.de/lernprogramm/grd.htm> Abrufdatum: 2003-12-15.
- Hinrainer, M.; Spitzner, W.: Tastsinn. 2003. [http://www.g-netz.de/Der\\_Mensch/sinnesorgane/tastsinn.shtml](http://www.g-netz.de/Der_Mensch/sinnesorgane/tastsinn.shtml) Abrufdatum: 2003-12-15.
- Howe, J. D.; Miller, M. A.; Blumer, R. V.; Petty, T. E.; Stevens, M. A.; Teale, D. M.; Smith, M. H.: Polarization sensing for target acquisition and mine detection. 2000. <http://www.osig.uah.edu/pdf/pol/Polarization%2520Mine%2520Detection.pdf>. Abrufdatum: 2003-12-15.
- Huder, B.: Einführung in die Radartechnik. Leipzig. 1999.

- Hyperkommunikation. Bild. 2003.  
<http://www.hyperkommunikation.ch/lexikon/bild.htm> Abrufdatum: 2003-12-27.
- Kimmich, R.: Ohne vorhersehbaren Anwendungsaspekt. 2001. <http://www.uni-ulm.de/uui/2001/nr246.htm> Abrufdatum: 2003-12-15.
- Kratz, A.: Die Schallgeschwindigkeit in der Luft je nach Temperatur. 2003.  
<http://134.176.128.63/schall.html> Abrufdatum: 2003-12-15.
- Küchenmeister, T.: Die Minenopfer: Bilanz des Schreckens. 2003.  
<http://www.landmine.de/de.titel/de.opfer/de.bilanz/index.html> Abrufdatum: 2003-12-15.
- Küchenmeister, T.: Probleme der Minendefinition. 2003.  
<http://www.landmine.de/de.titel/de.mineninfos/de.glossar/de.probleme/index.html> Abrufdatum: 2003-12-15.
- Lambers, M.; Grosse-Lordemann, C.: Objekterkennung in Bilddaten. 2003. Seminar zum Thema „Unterstützung von Landminendetektion durch Bildauswertungsverfahren und Robotereinsatz“ an der Westfälischen Wilhelms-Universität.
- LEGO Gruppe: Mindstorms. 2003. <http://mindstorms.lego.com/de/index.asp> Abrufdatum: 2003-12-15.
- Lossau, N.: Röntgen – Eine Entdeckung verändert unser Leben. 1995. Köln.
- MacDonald, J.: Alternatives for landmine Detection. 2003.
- Meyer, U.: Radioaktivität. 2003.  
<http://www.gsi.de/presse/radioaktivitaet/fotos/dokumentation/> Abrufdatum: 2003-12-15.
- Microsoft Encarta Enzyklopädie. 2004.
- Putzer, H.; Kollmann, G.: Der Ultraschall in der Natur. 2002. <http://www.bmtp.akh-wien.ac.at/people/kollch1/scw2002/usnatur.html> Abrufdatum: 2003-12-15.
- Schnaider, M: Mustererkennung. 2003.  
[http://www.zgdv.de/zgdv/departments/z2/Z2Staff/schnaide/local\\_images/ME2003-05.pdf](http://www.zgdv.de/zgdv/departments/z2/Z2Staff/schnaide/local_images/ME2003-05.pdf). Abrufdatum: 2003-12-27.
- Schnitzler, H.-U.; Denzinger, A.; Siemers, B. M.: Arbeitsgruppe "Echoortung und Verhalten bei Fledermäusen und Delfinen". 2003.  
<http://www.uni-tuebingen.de/tierphys/Fledermaeuse/Echoortung.htm> Abrufdatum: 2003-12-15.
- Scholz, O.R.: Was ist ein Bild? 2003. <http://userpage.fu-berlin.de/~sybkram/medium/scholz.html> Abrufdatum: 2003-12-27.
- Schult, T.J.: Roll mich an – Roboter für den Hausgebrauch: Servicekräfte oder Spielzeug?. 1999.
- Shirvanian, M.: Bildgewinnung. 2003. Seminar zum Thema „Unterstützung von Landminendetektion durch Bildauswertungsverfahren und Robotereinsatz“ an der Westfälischen Wilhelms-Universität.
- Space Computer Corporation: Ground-Station Display from Hyperspectral Mine Detection (HMD) Program. 2003. [http://www.spacecomputer.com/HMD\\_ground.html](http://www.spacecomputer.com/HMD_ground.html) Abrufdatum: 2003-12-15.

terre des hommes: Thema: Landminen. 2003.

<http://www.oneworldweb.de/tdh/themen/landminen/faq.html> Abrufdatum:  
2003-12-15.

van Kaick, G.: Kernspintomographie. 2003.

<http://www.krebsinformation.de/kernspintomographie.html> Abrufdatum: 2003-  
12-15.

Westdeutscher Rundfunk. Sensortechnik: Stärken und Schwächen. 2003.

<http://www.quarks.de/minen/0503.htm> Abrufdatum: 2003-12-28.

Wikipedia. Abbildung. 2003. <http://de.wikipedia.org/wiki/Abbildung> Abrufdatum:

2003-12-27.

Wikipedia: Schallgeschwindigkeit. 2003.

<http://de.wikipedia.org/wiki/Schallgeschwindigkeit> Abrufdatum: 2003-12-15.