

Anwendung bildgebender Verfahren für die Metalldetektion in der humanitären Minenräumung

H. Krüger, H. Ewald, Th. Krüger, S. Schulze, U. van Rienen, H.-W. Glock
Universität Rostock

1. Einleitung

Zur Räumung von Landminen verseuchter Gebiete werden heute neben Spürhunden und Suchnadeln fast ausschließlich Metalldetektoren eingesetzt. Die auf dem Markt verfügbaren zur Minensuche spezialisierten Metalldetektoren zeichnen sich zwar durch eine sehr hohe Empfindlichkeit auch auf kleine Metallteile aus, geben jedoch keine Auskunft über die Beschaffenheit (Tiefe, Größe, Material) des vergrabenen Objekts. Zudem macht die hohe Fehlalarmrate der handgeführten Detektoren die Minenräumung zu einem langwierigen und kostenintensiven Prozess. Gründe für die hohe Fehlalarmrate sind unkooperative Böden, metallische Objekte wie Munitionssplitter, aber auch der in neueren Antipersonenminen immer geringer werdende Metallanteil. Die Detektoren müssen für die Suche derartiger Minen bei maximaler Empfindlichkeit betrieben werden, womit die Fehlalarmrate weiter steigt.

Metalldetektoren, die nach dem Wirbelstromprinzip mit Impuls- oder harmonischer Anregung arbeiten, setzen die Empfangssignale in ein akustisches Signal um, welches dem Bediener das Vorhandensein eines metallischen Objekts signalisiert. Die zweidimensionale Positionsbestimmung (pinpointing) ist für den ausgebildeten Minensucher problemlos möglich. Eine sichere Bestimmung der Objekteigenschaften (Tiefe, Größe, Form, Material) ist jedoch nicht möglich.

Bildgebende Verfahren kommen bei der Kriegsmittelräumung in der Praxis bisher nur für die Suche größerer Objekte (Unexploded Ordnance UXO) zum Einsatz. Die Referenzierung der Messdaten erfolgt in der Regel über Positionsgeber an den Rädern des Sensorträgers und/oder (Differential-) GPS. Anhand der Visualisierung der großflächig aufgenommenen Daten werden die Positionen verdächtiger Objekte bestimmt. Für die Minenräumung ist dies Verfahren nicht einsetzbar, da das Feld nicht gefahrlos abgefahren werden kann. Zudem ist die Auflösung eines Differential GPS abhängig von den Empfangsbedingungen (Abschattung) und prinzipiell zu gering, um die Sensordaten für die Gewinnung klassifizierbarer Signaturen von Anti-Personen-Minen zu referenzieren.

2. Mathematische Modellierung minenähnlicher Objekte

Die Simulationen minenähnlicher Objekte unter einer Spulenanordnung mit Standardprogrammen, wie in Abbildung 1 dargestellt, erfordern viel Speicher und Rechenzeit. Komplizierte Modelle können teilweise gar nicht berechnet werden. Der sehr hohe Aufwand entsteht durch die verhältnismäßig kleinen metallischen Objekte im Vergleich zu den Spulen des Metalldetektors. Die Objekte müssen aufgrund des Skineffektes sehr fein diskretisiert werden. Bei der Feinheit des Gitters außerhalb der Objekte ist ein Kompromiss zwischen dem

Speicheraufwand, welcher direkt mit der Anzahl der zu berechnenden Gitterpunkte korreliert, und der Rechenzeit, welche infolge schlechter Konvergenz durch enorme Größenunterschiede der Gitterzellen sehr lang werden kann, zu finden.

Aus diesem Grund wird für die **Finite Integrationstechnik (FIT)** [1]-[3] eine Gebietszerlegungsmethode implementiert, bei der das Rechengebiet zunächst in zwei Gebiete unterteilt wird. Bei mehreren Objekten sind auch weitere Gebiete denkbar. Im ersten Gebiet, welches das gesamte Rechengebiet ohne das metallische Objekt umfasst, findet ein grobes Gitter Verwendung, während im zweiten Gebiet mit dem Objekt eine sehr feine Diskretisierung gewählt wird. Beide Diskretisierungen sind voneinander völlig unabhängig. Die Kopplung der beiden Gebiete erfolgt über die Zwangsbedingung, dass die zu berechnenden Größen auf dem Kopplungsrand gleich sein müssen. Auf diese Weise können vor allem überflüssige Gitterpunkte und somit Speicher eingespart werden.

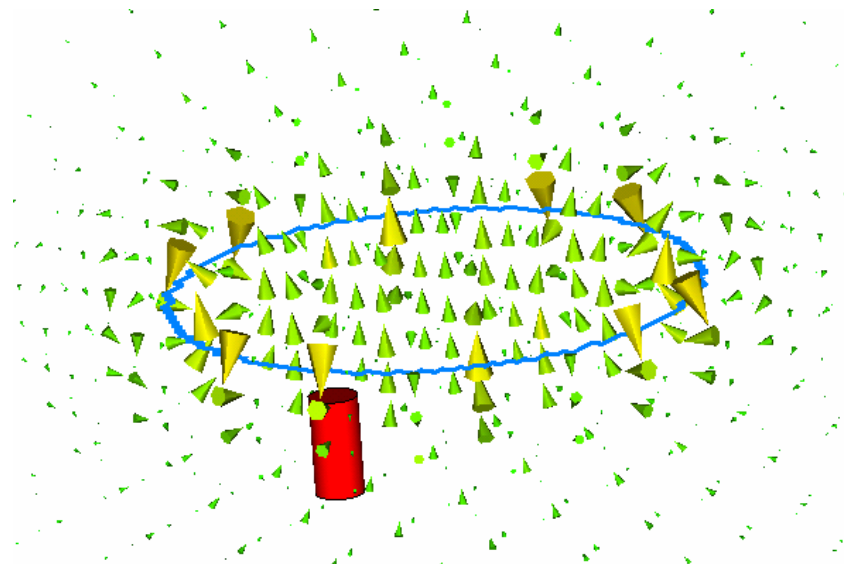


Abbildung 1: Magnetische Flussdichte B eines metallischen Objektes unter einer stromführenden Spule berechnet mit CST EM-Studio™

3. Visualisierung orts aufgelöster Sensordaten

Für die Visualisierung der Sensordaten lassen sich unter Laborbedingungen die Messwerte mit Hilfe eines x-y-Scanners in einem festen 2D-Raster abtasten (Abbildung 2). Die örtlich hoch aufgelösten Messdaten werden als:

- Rohdaten (Footprint)
- Rekonstruiertes Bild (Entfaltung)
- oder Phasenschleifen in der komplexen Ebene dargestellt.

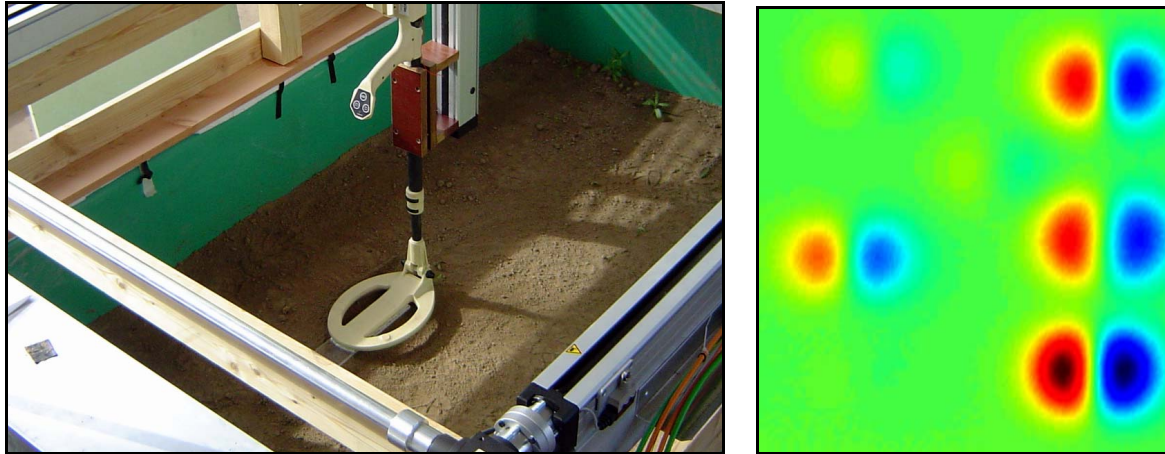


Abbildung 2: Messung verschiedener Objekte im Boden (re.: Rohdaten)

Ein handgeführtes System erfordert jedoch einen leichten und berührungsfrei arbeitenden Positionssensor mit einer Auflösung im mm Bereich. Hierfür wird ein spezielles optisches Positionsmesssystem verwendet, welches zu jedem Messwert die x,y-Position in der Ebene zuordnet.

Eine online - Visualisierung der Rohdaten gibt dem Minensucher zunächst nur wenig Mehrinformationen gegenüber dem derzeit verwendeten akustischen Signal. Aus einem solchen Bild wird dem Minensucher aber direkt ersichtlich, ob die 2D-Signatur eines Objektes bereits vollständig erfasst wurde und ob ein mehrfach Scann zur Verbesserung des Signal/Rausch-Verhältnisses erforderlich ist.

Die Implementierung der handgeführten Messwertaufnahme ist Stand der aktuellen Arbeit.

4. Bildgebende Rekonstruktionsverfahren - Entfaltung der Rohdaten

Die Methode der Entfaltung ist ein gängiges Rekonstruktionsverfahren u.a. im Bereich der bildgebenden Wirbelstromprüfung [4]. Für die Rekonstruktion ist die Kenntnis der Sensor Aperturfunktion erforderlich, welche durch Messung über einen sehr kleinen Störer oder analytische bzw. numerische Berechnung bestimmbar ist. Ein bekanntes Verfahren ist die Entfaltung der ortsaufgelösten Messung mit der Aperturfunktion des Sensors unter Verwendung eines Wiener- oder Energie minimierenden Filters. Die direkte Form der Entfaltung mit $1/H(f)$ als Inversfilter:

$$f(x, y) = F^{-1} \left\{ \frac{G(f)}{H(f)} \right\} \quad \begin{array}{l} f \text{ Original (im Ortsbereich)} \\ G \text{ gemessenes Bild} \\ H \text{ Sensor Aperturfunktion (PSF)} \end{array} \quad (1)$$

ist bei verrauschten Messdaten nicht anwendbar, da besonders kleine Werte im Spektrum der Aperturfunktion $H(f)$ bei der Entfaltung mit dem inversen Filter $1/H(f)$ zu einer starken Verstärkung der Rauschanteile führt. Dieses Problem wird bei der Wienerfilterung durch die Einführung des Rauschterms gelöst. Die genaue Bestimmung des Rauschterms erfordert jedoch die Kenntnis des Verhältnisses der spektralen Verteilung des Rausch- zum Nutzsignal (in der Regel nicht bekannt). Im Allgemeinen wird der Rauschterm empirisch angenähert.

Der Ansatz des Energie minimierenden Filters setzt hingegen bei der Entfaltung den unbestimmten Term 0/0 (unter Anwendung eines Schwellwerts) auf Null, womit die Gesamtenergie des Ergebnissignals verringert wird [4]. Bei der Entfaltung der Metalldetektor-Rohdaten werden mit dieser Methode geringfügig schärfere Abbildungen im Vergleich zum Wienerfilter erzielt.

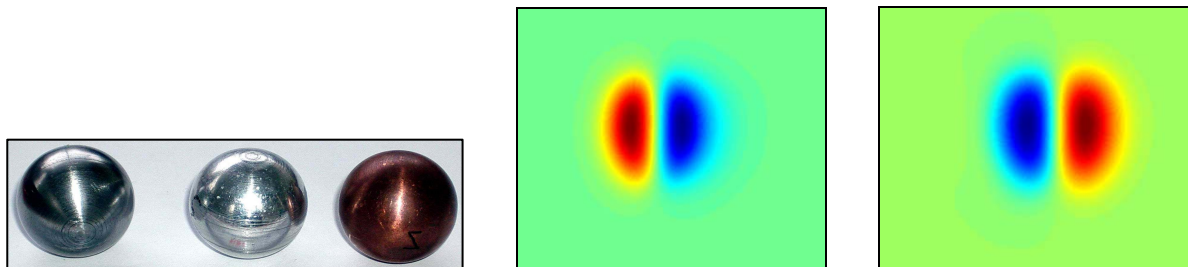


Abbildung 3: Objekte (Kugeln $d=28\text{mm}$, Stahl, Alu, Cu), Rohdaten: Real, Imag.

Durch Entfaltung ist eine gute Trennung der Objekte aus Abbildung 3 mit einer horizontalen Verteilung von 5 cm Mittenabstand bis ca. 5 cm Tiefe möglich. Die komplexe Entfaltung gestattet zudem die Unterscheidung von Eisen- und Nichteisenmetallen anhand der Phase (Abbildung 4). Das Verhältnis vom Objektdurchmesser (Kugel) zum Durchmesser der Detektorspule beträgt ca. 1:8.

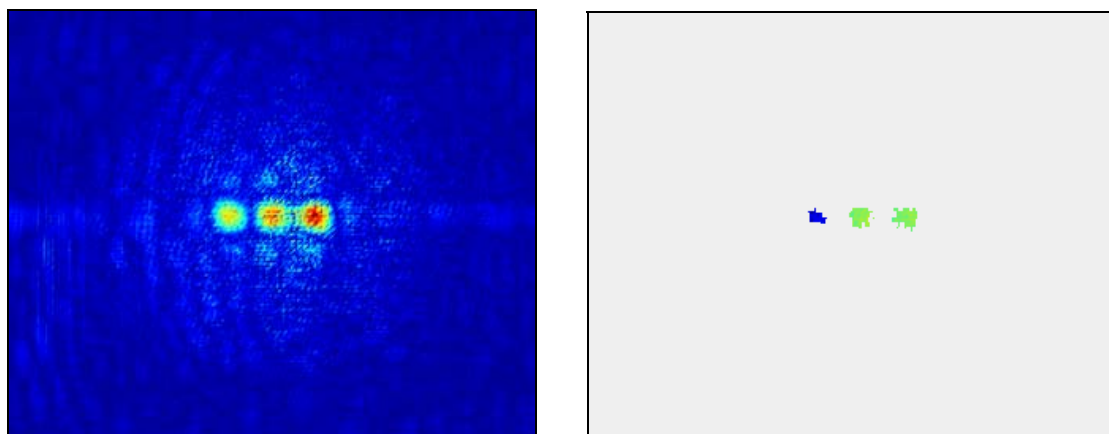


Abbildung 4: Entfaltung - Betrag (li.), Phase (re.)

Auf Grund des sehr geringen Metallgehalts aktueller Anti-Personenminen sowie der hohen Anforderungen an die Ortsreferenzierung der Sensordaten ist diese Methode für Feld-Messungen mit handgeführten Detektoren jedoch ungeeignet.

5. Klassifikation anhand der Phasenlage

Deutlich geringere Anforderungen bezüglich des Abtastrasters und des Signal/Rauschverhältnisses erfordert die Darstellung der Objektsignaturen in der komplexen Ebene (Phasenschleifendarstellung). Es entsteht so zwar kein direktes Abbild des potentiell gefährlichen Objekts, jedoch eine Signatur die für dessen Material, Form und Lage der metallischen Bestandteile bezeichnend ist (Abbildung 5).

Die Darstellung der Phasenschleifen ist ein bekanntes Verfahren der Wirbelstromprüfung [5], eine Übertragung auf die Minendetektion wird in [6] und [7] beschrieben.

Solche Darstellungen allein erfordern jedoch viel Erfahrung seitens des Minensuchers, um anhand der Signatur eine Entscheidung zu treffen. Der Informationsgehalt dieser Darstellungen ist daher durch geeignete Algorithmen zu verdichten (Merkmalsextraktion).

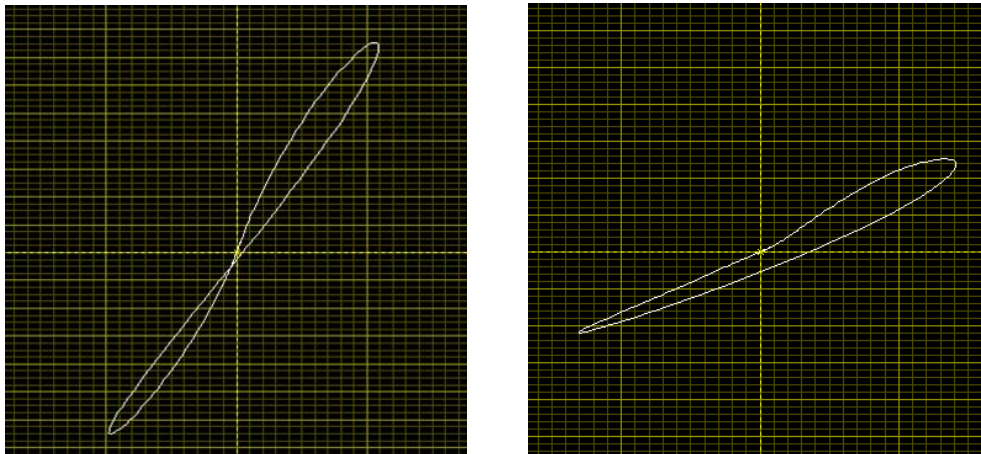


Abbildung 5: Signatur: Mine (li.), Alu-Dose (re.)

Der in der Regel bekannten Varianz unterschiedlicher Minen steht im Feld eine nahezu unbegrenzte Anzahl möglicher Störkörper (Clutter) gegenüber. Als Datenbasis für eine Klassifikation sind demnach nur die Merkmale der Minensignaturen sinnvoll. Begünstigend kommt hinzu, dass dem Minensucher häufig bekannt ist, welche Minentypen (oft nicht mehr als zwei) in einem Gebiet verlegt sind.

Signaturen, welche sich deutlich von denen gesuchter Minen unterscheiden, können somit als Fehlalarm gewertet werden. Die Gewichtsfunktionen zur Unterscheidung Mine/Fehlalarm sind adaptiv an die Signalqualität (Signal/Rauschverhältnis) anzupassen. Somit wird gewährleistet, dass eine veräusserte Signatur als potentiell gefährlich angezeigt wird, auch wenn sie sich von einer Minensignatur unterscheidet.

Voraussetzung für eine sichere Erkennung nach diesem Verfahren ist jedoch, dass sich im direkten Umfeld der Mine kein weiteres Metallteil befindet. Insbesondere größere Metallteile können die Signatur einer benachbarten Mine maskieren. Der Mindestabstand eines Störkörpers zur Mine muss daher größer als das ein- bis zweifache vom Durchmesser der Suchspule sein.

6. Zusammenfassung

Ein Hauptproblem der Minenräumung ist die hohe Fehlalarmrate, welche hauptsächlich durch Bodeninhomogenitäten und harmlose Metallteile (Clutter) bestimmt wird.

Durch die Auswertung multivariater orts aufgelöster Sensordaten ist eine Senkung der Fehlalarmrate möglich (Bodenkompensation, Klassifikation der Signaturen). Insbesondere bei Räum szenarien mit a priori Informationen über die im Feld verlegten Minentypen ist durch die Klassifikation der Signale zur

Unterscheidung Mine/Clutter eine deutliche Senkung der Fehlalarmrate zu erreichen. Die hierfür erforderliche Datenbasis (Referenzsignaturen) wird derzeit durch Labormessungen gewonnen.

Eine Klassifikation auf Grundlage simulierter Daten setzt einen schnellen Solver für die Berechnung elektromagnetischer Felder, auch bei schwierigen geometrischen Größenverhältnissen, voraus. Hierfür wurde zunächst eine Gebietszerlegungsmethode implementiert.

- [1] Weiland, T.: Time domain electromagnetic field computation with finite difference methods, Int. Num. Mod.: ENDF, vol.9, pp.259-319,1996
- [2] CST EM Studio™, Bad Nauheimer Str. 19, 64289 Darmstadt
- [3] Barchanski, A., Clemens, M., De Gersem, H., Steiner, T., Weiland, T.: Using Domain Decomposition Techniques for the Calculation of Low Frequency Electric Current Densities in High Resolution 3D Human Anatomy Models, 11th International IGTE Symposium, 2004
- [4] Mook, G., Simonin, J. Heindörfer, F.: Aspekte der Bildgewinnung und -verarbeitung in der Wirbelstromprüfung, DGZfP Jahrestagung 1994, Berichtsband Teil 1, S. 255-262
- [5] Mook, G.: Dissertation - Zur Mehrparameteranalyse in der Wirbelstromprüfung, Magdeburg 1990
- [6] Bruschini, C.: A Multidisciplinary Analysis of Frequency Domain Metal Detectors for Humanitarian Demining, Brüssel 2002
- [7] Druyts, P., Merlat, L., Acheroy, M.: Modeling considerations for imaging with a standard metal detector, Brüssel 2000