

# Verfahren zur Störsignalunterdrückung und Signaturklassifikation zur Senkung der Fehlalarmrate induktiver Metalldetektoren für die humanitäre Minensuche

Hendrik KRÜGER, Hartmut EWALD  
University of Rostock, Institute of General Electrical Engineering,  
Justus-von-Liebig-Weg 2, 18059 Rostock, Germany

**Kurzfassung.** Für die humanitäre Minensuche werden heute induktive Metalldetektoren eingesetzt, welche zwar eine hohe Empfindlichkeit zum Nachweis kleinster Metallteile, damit aber auch eine sehr hohe Fehlalarmrate aufweisen. Der Informationsgehalt der Messsignale heutiger Metalldetektoren ist jedoch deutlich höher als bisher von allen auf dem Markt verfügbaren Detektoren genutzt. Insbesondere Metalldetektoren mit multi-frequenter Anregung weisen ein hohes Potential zur Senkung der Fehlalarmrate durch eine bessere Signalverarbeitung auf. In diesem Beitrag werden neue Methoden zur nutzsinaloptimierten Bodenunterdrückung und zur Objektklassifikation vorgestellt. Deren Grundlage ist primär die Auswertung multivariater orts aufgelöster Messdaten und der Einbezug von a-priori Informationen über die bekannten Minentypen.

## Einführung

Infolge militärischer Auseinandersetzungen sind heute weltweit über 110 Millionen Minen verlegt, denen jährlich mehr als 26 000 Menschen, überwiegend Zivilpersonen, zum Opfer fallen [1]. Nicht geräumten Minenfelder stellen, neben der Gefahr für die dort lebenden Menschen, ein Hemmnis für die wirtschaftliche Entwicklung betreffender Regionen dar.

Bei der humanitären Minenräumung werden heute neben Spürhunden und Suchnadeln fast ausschließlich Metalldetektoren eingesetzt. Die auf dem Markt verfügbaren zur Minensuche spezialisierten Metalldetektoren basieren auf dem Wirbelstromprinzip mit Impuls- oder harmonischer Anregung. Sie zeichnen sich 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 Metalldetektoren die Minenräumung zu einem langwierigen und kostenintensiven Prozess. Gründe für die hohe Fehlalarmrate (bis zu 1000 Alarmsituationen je Minenfund) sind so genannte „unkooperative“ Böden mit magnetischen Eigenschaften, harmlose metallische Objekte, wie z.B. Munitionssplitter (Clutter), aber auch der in neueren Antipersonenminen immer geringer werdende Metallanteil.

Im Folgenden wird gezeigt, wie durch Auswertung multivariater Wirbelstrom-Messdaten und die Nutzung von a-priori-Informationen die Fehlalarmrate deutlich gesenkt werden kann.

## 1. Induktive Metalldetektion

Bei induktiven Metalldetektoren wird eine Sendespule von einem zeitlich veränderlichen Strom  $I_{\text{prim}}(t)$  durchflossen, welcher ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld  $B_{\text{prim}}(t)$  zur Folge hat. Befindet sich in dessen Einflussbereich ein elektrisch leitfähiges Objekt, wird durch das elektrische Wirbelfeld eine Stromdichte  $J_{\text{sek}}(t)$  induziert. Die im Objekt fließenden Wirbelströme verursachen ein sekundäres Magnetfeld  $B_{\text{sek}}(t)$ , welches dem der Sendespule entgegen wirkt.

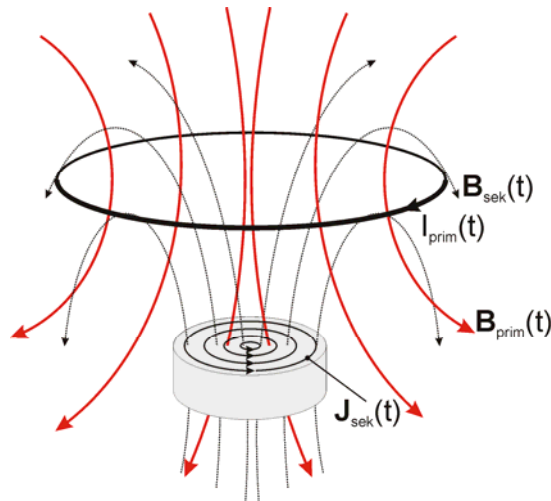


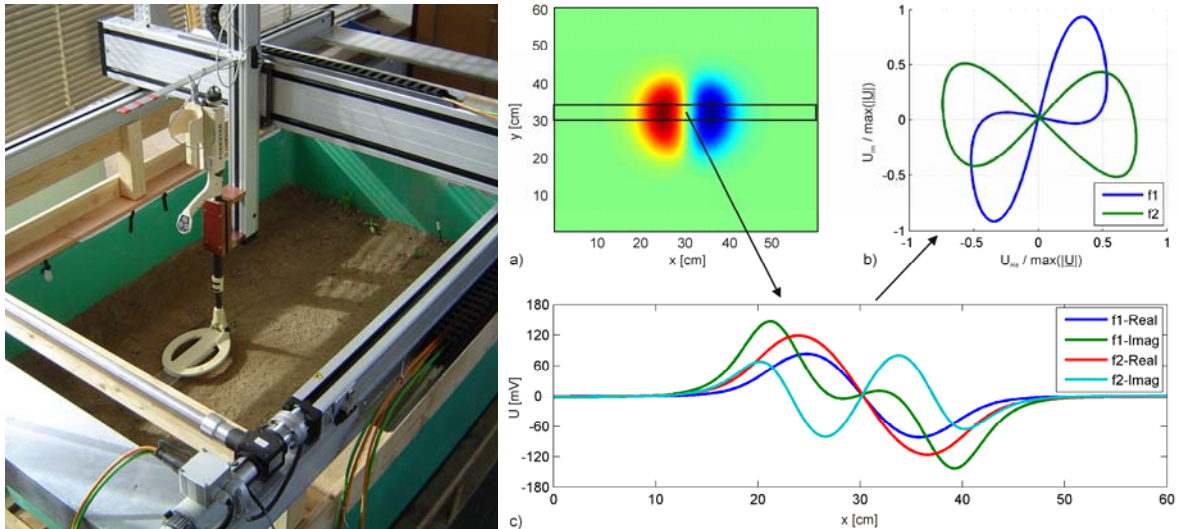
Abb. 1: Metallobjekt unter einer Stromdurchflossenen Spule

Die Wirkung der Wirbelströme im Metallobjekt kann über diesen Zusammenhang als Änderung der Spulenimpedanz (parametrischer Sensor) oder als induzierte komplexe Empfangsspulenspannung (transformatorische Spulenordnung) messtechnisch erfasst werden. Die Eindringtiefe  $\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}$  der Wirbelströme in das Metallobjekt sind von dessen Materialparametern (magnetischen Permeabilität  $\mu$  und elektrischen Leitfähigkeit  $\sigma$ ) und der Anregungsfrequenz  $f$  abhängig. Diese Gleichung beschreibt jedoch nur ein vereinfachtes Modell (ebene Welle - leitender Halbraum). Zusätzlich ist die Eindringtiefe von den geometrischen Parametern der Erregerspule und des Metallobjektes abhängig. Im NDT Bereich wird der beschriebene Zusammenhang genutzt um unterschiedliche Materialien oder Materialfehler (metallische Einschlüsse, Risse) zu klassifizieren oder Stör- und Zielgrößen zu separieren. Die Frequenzabhängigkeit der Wirbelstromeindringtiefe wird bei der Mehrfrequenz-Wirbelstromtechnik genutzt, um linear unabhängige Messgrößen und damit zusätzliche Informationen über das Prüfobjekt zu erhalten.

Heutige für die Minensuche eingesetzte Metalldetektoren nutzen jedoch nur einen Bruchteil der in den Wirbelstromsignalen enthaltenden Informationen. Zwar verfügen alle aktuellen Geräte über Algorithmen zur Kompensation von Böden mit magnetischen Eigenschaften, jedoch bisher nicht in Verbindung mit einer Objektklassifikation.

### 1.1 Hinweise zu den experimentellen Untersuchungen

Die nachfolgend beschriebenen Methoden beruhen auf der Verarbeitung von Sensordaten eines modifizierten (Rohdatenausgang) zwei-Frequenz Metalldetektors mit sinusförmiger Anregung bei 2,4 kHz und 19,2 kHz. Der Detektor verfügt über eine transformatorische Differenzspule (doppel-D) zur Kompensation des Erregerfelds in der Empfangsspule. Die Rohsignalausgänge  $c_1 \dots c_4$  verhalten sich proportional der in der Empfangsspule induzierten komplexen Spannung (Real- und Imaginärteil für 2 Frequenzen). Der Detektor wird von einem Drei-Achsen-Scanner, aufliegend auf Wannen mit verschiedenen Böden, geführt. Die orts aufgelösten Sensordaten werden über eine Messwerterfassungskarte aufgezeichnet.



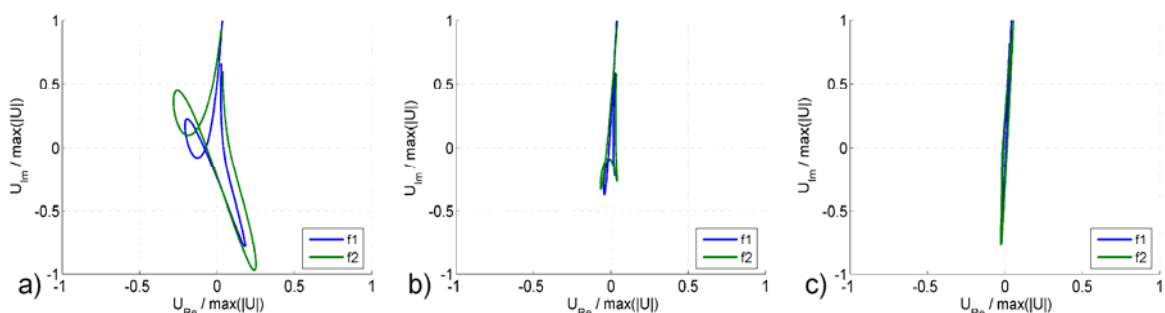
**Abb. 2:** Drei-Achsen-Scanner zur Aufnahme orts aufgelöster Sensordaten (Objekt: Mine M2B in 5cm Tiefe), a) 2D-Scan  $U_{Re\_f1}(x,y)$ , b) Phasenschleifendarstellung, c) Messsignale  $U(x)$  für  $f_1=2,4$  kHz und  $f_2=19,2$  kHz.

## 2. Kompensation des Einflusses magnetisch permeabler Böden

Unkooperative Böden, welche auch ohne vorhandene Metallkomponenten ein Detektorsignal generieren, sind überwiegend durch eine hohe magnetische Suszeptibilität gekennzeichnet. Sie hängt überwiegend vom Gehalt des Bodens an ferrimagnetischen (z. B.: Magnetit ( $Fe_3O_4$ ), Maghemit ( $\gamma Fe_2O_3$ )) und antiferromagnetischen Mineralen (z. B.: Hämatit ( $\alpha Fe_2O_3$ ), Goethit ( $\alpha FeOOH$ )) ab [2]. In geringerem Maße kann auch eine erhöhte elektrische Leitfähigkeit, verursacht durch im Wasseranteil des Bodens gelöste Ionen, zur Beeinträchtigung der Detektorleistung führen. Dielektrische Bodeneigenschaften können im für Metalldetektoren relevanten Frequenzbereich hingegen vernachlässigt werden.

Bodeneinflüsse sind bei der Minensuche ein generelles Problem, weil die bodeninduzierte Empfangsspulenspannung im Bereich derer von Minimum-Metall- oder tief vergrabenden Minen liegt. Dies verursacht zum einen den deutlichen Anstieg der Fehlalarmrate bei der Detektion und verhindert zum anderen die Klassifikation bekannter Minen Anhand ihrer typischen Signatur z.B. in Form von Wirbelstrom-Phasenschleifen. Wie in Abb. 3 gezeigt, kann der Bodeneinfluss die Signatur einer Mine schon bei geringen Tiefen deutlich verfälschen. Die Signaturen eines Minentyps in unterschiedlichen Tiefen sind aufgrund des unkooperativen Bodens nicht direkt vergleichbar. Bereits unterhalb von 2 cm Tiefe dominiert in diesem Beispiel der Bodeneinfluss. Eine Steigerung der Empfindlichkeit des Detektors erfordert somit stets eine leistungsfähige Unterdrückung der Bodeneinflüsse.

Während homogene Böden bereits durch die Sensor konstruktion (Differenzspule) gut zu kompensieren sind, ist die Unterdrückung des Effekts von Böden mit inhomogen verteilten magnetischen Eigenschaften nur algorithmisch möglich.



**Abb. 3:** Signaturen der Mine M2B in einem stark unkooperativen Boden a) 2 cm, b) 6 cm, c) 10 cm Tiefe

## 2.1 Bodenkompensation durch Störgrößenminimierung

Aus dem Bereich der Wirbelstromprüfung ist bekannt, dass mit  $N$  linear unabhängigen Messgrößen  $N-1$  Störgrößen unterdrückt werden können. Dieses Verfahren wird auch bei der Bodenkompensation angewandt, indem sich das Alarmverursachende Signal als Linearkombination  $c' = \mathbf{a} \cdot \mathbf{c}$  mindestens zweier Messsignalkomponenten  $\mathbf{c} = c_1 \dots c_N$  ergibt. Der Koeffizientenvektor  $\mathbf{a}$  wird so eingestellt, dass der Bodeneinfluss in der kombinierten Komponente  $c'$  minimal ist. Die Bestimmung des Koeffizientenvektors  $\mathbf{a}$  kann z.B. durch Gleichung (1) auf Grundlage einer Bodenmessung mit  $N$  Signalkomponenten und  $M$  Messpunkten erfolgen.

$$\min_{\mathbf{a}} \sum_{k=1}^M (a_1 \Delta c_{1,k} + \dots + a_{N-1} \Delta c_{N-1,k} - \Delta c_{N,k})^2 \quad (1)$$

Ein Nachteil der Methode der kleinsten Quadrate ist die Unsymmetrie, welche bei Austausch der abhängigen und unabhängigen Variablen auftritt, da die Minimierung der Restanzeige nur bezüglich der abhängigen Komponente ( $c_N$ ) erfolgt. Für den zweidimensionalen Fall bedeutet dies, dass die Bestimmung des Koeffizientenvektors  $\mathbf{a}$  nach Gl. (1) für  $\mathbf{c} = (c_1, c_2)$  und  $\mathbf{c} = (c_2, c_1)$  zu widersprüchlichen Abhängigkeiten der Komponenten  $c_1$  und  $c_2$  führt.

Besser geeignet ist in diesem Fall die Methode der Orthogonalen Regression (auch: Total Least Squares), mit welcher die Summe der quadrierten Abstände aller Messpunkte senkrecht zur Regressionsgeraden (2D), -Ebene (3D) oder -Hyperebene (N-D) minimiert wird. Nach [3] führt das zu einem Minimierungsproblem gemäß Gl. (2) bzw. (3) in Matrixschreibweise mit der Messwertmatrix  $\mathbf{C}$  vom Typ  $(M, N)$  ( $M$ : Anzahl der Messungen,  $N$ : Anzahl der Messgrößen) und dem Koeffizienteneinheitsvektor  $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_N)$ .

$$\min_{\mathbf{a}} \sum_{m=1}^M (a_1 \Delta c_{1,m} + a_2 \Delta c_{2,m} + \dots + a_N \Delta c_{N,m})^2, \quad \sum_{n=1}^N a_n^2 = 1 \quad (2)$$

$$\min_{\mathbf{a}} \|\mathbf{C}\mathbf{a}\|^2, \quad \|\mathbf{a}\|^2 = 1, \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} \Delta c_{11} & \dots & \Delta c_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta c_{M1} & \dots & \Delta c_{MN} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Unter Verwendung der Singulärwertzerlegung der Matrix  $\mathbf{C}$  in  $\mathbf{C} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T$  erhält man den Koeffizientenvektor  $\mathbf{a} = \mathbf{v}_N$  als  $N$ -te Spalte von  $\mathbf{V}$ , welche zum kleinsten (letzten) Singulärwert gehört.

In dem durch die  $N$  Messkomponenten aufgespannten Raum (mit  $N$  Dimensionen) ist  $\mathbf{a}$  der Normaleneinheitsvektor senkrecht zur ausgleichenden Geraden, Ebene oder Hyperebene durch die Messpunkt wolke, welche den Einfluss der Störgrößen beschreibt. Die Restanzeige der Störgrößen ist bei Projektion des Messgrößenvektors  $\mathbf{c}$  auf den Vektor  $\mathbf{a}$  demnach minimal. Man erhält somit die störgrößenkompensierte Komponente  $c'$  als Skalarprodukt von  $\mathbf{a}$  mit dem Messgrößenvektor  $\mathbf{c} = (c_1, c_2, \dots, c_N)$ .

Dieses Vorgehen hat dennoch einige Nachteile. Bei der alleinigen Minimierung der Störgröße (Boden) wird die Wirkung auf die Zielgröße (Mine) vernachlässigt. Das Zielgrößensignal wird dabei um so stärker verringert, je ähnlicher es dem der Bodeninhomogenitäten ist (geringer Differenzwinkel in der Wirbelstrom-Phasenschleifen-Darstellung). Weiterhin führt die Reduktion der Ausgangsgrößen  $c_1 \dots c_N$  zu einer einzigen kompensierten Komponente  $c'$  zum Verlust des Großteils der in den multivariaten Messsignalen enthaltenen Informationen, welche für eine Objektklassifikation (Mine vom Typ X oder Clutter) erforderlich sind.

## 2.2 Bodenkompensation unter Beachtung der Zielgrößen

Sinnvoller als eine höchstmögliche Minimierung des Bodensignals ist ein Bodenkompensation mit einem möglichst hohem Nutz-zu-Störgrößen-Verhältnis von  $c'$ . Dieses ist jedoch nur bei bekannten Zielgrößen möglich. Für die Anwendung bei der Minenräumung sind in den allermeisten Fällen die verlegten Minentypen im Voraus bekannt (a-priori Informationen). Selten sind mehr als 1-2 unterschiedliche Typen in einem Feld verlegt. Die Wirkung der Minen auf die Detektorsignale  $c$  kann daher zuvor im Labor vermessen werden. Hieraus wird eine Minen-Signaturdatenbank erstellt, welche die Sensorrohdaten der gesuchten Minen bei verschiedenen Abständen von der Sensorspule und in mehreren Orientierungen enthält. Mit Hilfe dieser Datenbank kann der Bodeneinfluss im Verhältnis zum Minensignal minimiert werden. Als Gütekriterium wird hierfür das Minen-zu-Bodenrestsignal-Verhältnis (MBV) eingeführt.

## 2.3 Merkmalerhaltende Bodenkompensation

Aus dem NDT Bereich ist Allgemein bekannt, wenn mehr linear unabhängige Messgrößen zur Verfügung stehen, als die Störgrößenunterdrückung erfordert, diese zur Unterscheidung verschiedener Zielgrößen genutzt werden können (Klassifikation).

In [4] wird detailliert beschrieben, wie eine merkmalerhaltende Bodenkompensation mit Hilfe von Vorwissen zwischen den entgegengerichteten Optimierungszielen:

- starken Bodenunterdrückung (hohes MBV) und
- hohe Anzahl verbleibender Signalkomponenten für die Merkmalsextraktion

adaptiert.

Die Methode basiert ebenfalls auf der Singulärwertzerlegung jedoch wird für jede Hauptkomponente  $c'_{1..N} = \mathbf{a}_{1..N} \cdot \mathbf{c}$  das zugehörige MBV<sub>1..N</sub> nach Gl. (4) bewertet.

$$\text{MBV}_{1..N} [\text{dB}] = 20 \cdot \log_{10} \frac{\text{Max} |c'_{1..N\_Mine}(x)|}{\text{Max} |c'_{1..N\_Boden}(x, y)|} \quad (4)$$

$$\text{GMBV} [\text{dB}] = 20 \cdot \log_{10} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N k_i \cdot \text{Max} |c'_{i\_Mine}(x)|^2}{\sum_{i=1}^N k_i \cdot \text{Max} |c'_{i\_Boden}(x, y)|^2}} \quad (5)$$

Objekt, Tiefe [mm]	Kooperativer Boden				Unkooperativer Boden			
	MBV <sub>1</sub>	MBV <sub>2</sub>	MBV <sub>3</sub>	MBV <sub>4</sub>	MBV <sub>1</sub>	MBV <sub>2</sub>	MBV <sub>3</sub>	MBV <sub>4</sub>
M2B-25	42,8	<b>74,7</b>	60,1	60,3	4,7	45,9	<b>57,1</b>	56,8
M2B-50	31,9	<b>64,4</b>	47,8	46,8	-3,2	35,4	<b>44,9</b>	43,5
M2B-100	9,3	<b>45,1</b>	27,1	24,7	-28,7	16,2	24,5	<b>24,6</b>
M2B-150	-6,7	<b>28,7</b>	8,3	4,4	-45,1	-0,3	6,6	<b>8,4</b>

Boden- signal	c' <sub>1</sub>	c' <sub>2</sub>	c' <sub>3</sub>	c' <sub>4</sub>	c' <sub>1</sub>	c' <sub>2</sub>	c' <sub>3</sub>	c' <sub>4</sub>
		-28,8	-60,7	-62,7	<b>-66,8</b>	9,3	-31,9	-55,5

**Tab. 1:** Bodensignal und Minen-zu-Bodenrestanzeige-Verhältnis MBV<sub>1..4</sub> für die Hauptkomponenten  $c'_{1..4}$  am Beispiel der Minen M2B im kooperativen und unkooperativen Boden (Testfeld Rostock), Angaben in [dB]

Aus Tab. 1 wird zum einen ersichtlich, dass sich das Bodensignal erwartungsgemäß von der ersten zur vierten Hauptkomponente verringert, die letzte Hauptkomponente jedoch nicht Zwangsweise auch am besten zur Detektion der Mine geeignet ist. Zum anderen wird deutlich dass mehr als eine Hauptkomponente ein hohes MBV aufweist und somit den Informationsgehalt nutzbarer Komponenten erhöht.

Die Auswahl der nutzbaren Komponenten erfolgt auf Grundlage des Gruppen-Minen-zu-Bodenrestanzeige-Verhältnis (GMBV) nach Gl. (5).

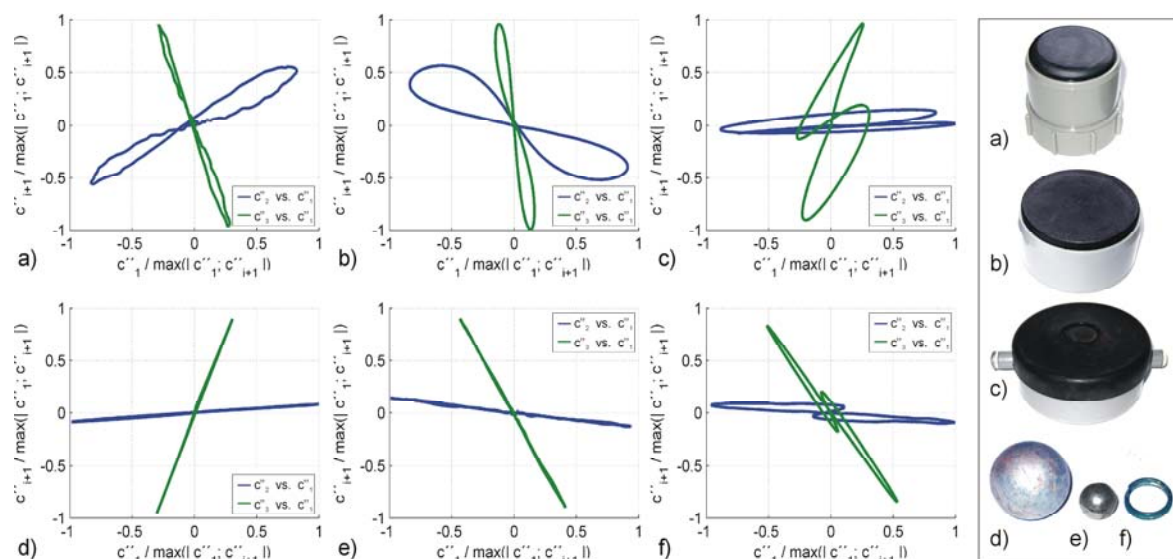
Das GMBV wird für alle möglichen Gruppierungen der Einzelkomponenten berechnet. Die Auswahl einer Gruppe zugehöriger Komponenten aus  $c'_{1..N}$  erfolgt durch elementweise Multiplikation mit dem Selektionsvektor  $\mathbf{k}$  der Länge  $N$ , welcher alle 0-1-Kombinationen von  $[0 \ 0 \ \dots \ 1]$  bis  $[1 \ 1 \ \dots \ 1]$  annehmen kann. Eine Gruppe besteht dabei jedoch aus mindestens zwei Komponenten. Somit sind  $2^{N-1}-1$  unterschiedliche Gruppen zu bilden.

Letztendlich wird die Gruppierung ausgewählt welche eine möglichst hohe Anzahl Bodenkompensierter Komponenten enthält und Gleichzeit eine festgelegte Mindesthöhe des GMBVs nicht unterschreitet.

Die selektierten Bodenkompensierten Signalkomponenten können ebenfalls als Phasenschleifenbild dargestellt werden. Jedoch sind die Signaturen nach Anwendung der Bodenkompensation zunächst nicht mit denen einer Mine in Luft vergleichbar. Für die sich anschließende Klassifikation ist daher auf die „Luft-Signaturen“ aus der Minensignaturdatenbank ebenfalls die Bodenkompensation anzuwenden (Projektion auf die selben Hauptkomponentenvektoren. Dabei ist die Vergleichbarkeit jedoch nur dann Gewährleistet, wenn die Eindringtiefe  $\delta$  der Wirbelströme (Gl. 1) im Boden deutlich größer als die Nachweistiefe der Metallobjekte ist. Für die Materialparameter real existierender Böden und Anregungsfrequenzen  $<100\text{kHz}$  ist dies gegeben.

### 3. Klassifikation von Minensignaturen mit Hilfe der Fuzzy Methode

Auch nach der merkmalerhaltenden Bodenkompensation unterscheiden sich die Signaturen in der Phasenschleifendarstellung deutlich (Abb. 4) [5]. Ein erfahrener Minensucher kann mit dieser Darstellungsform zwar visuell Objekte unterscheiden, Ziel sollte jedoch die automatische Trennung von (bekannten) Mintypen von (unbekannten) Clutterobjekten sein. Nachfolgend wird hierfür die Fuzzymethode verwendet, weil bei dieser a-priori Wissen leicht in die Regelbasis des Klassifikators einfließen kann.



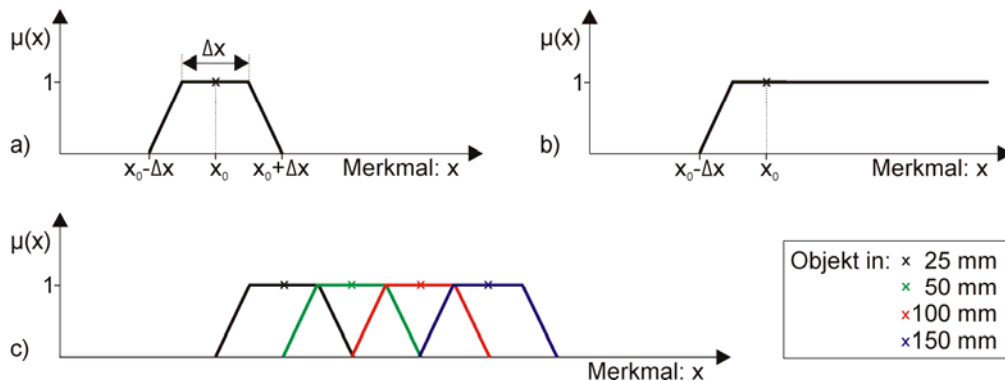
**Abb. 4:** Bodenkompensierte Signaturen, Minen: a) M1A, b) M2B, c) M3B und Clutter: d) Aluminiumkugel Ø 28 mm, e) Stahlkugel Ø 5 mm, f) Stahlring Ø 11 mm

### 3.1 Merkmalsextraktion

Die Merkmalsextraktion basiert im Folgenden auf den geometrischen Parametern der Wirbelstrom Phasenschleifen. Speziell werden die die Phasenwerte  $\alpha_i$  der einzelnen Phasenschleifen, die Schleifenausdehnung  $b_i$  als Verhältnis der Breite zur Länge jeder Phasenschleife und die (logarithmierte) Gesamtsignaturamplitude  $U_{\max}$  (bzw.  $U_{\max\_dBV}$ ) als Merkmalsgrößen verwendet. Der Index  $i$  (Anzahl der Schleifen der Signatur) ist stets eins kleiner als die Anzahl nutzbarer bodenkompensierter Signalkomponenten. Die Auswahl und Berechnung der Merkmalsgrößen ist detailliert in [4] beschrieben.

### 3.2 Fuzzyfizierung: Umwandlung quantitativer Merkmalsgrößen in qualitative Größen

Die Auswahl der Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktion erfolgt durch Vorwissen über die Aussagekraft der jeweiligen Merkmale. Im Folgenden werden Zugehörigkeitsfunktionen in der S- und  $\pi$ -Form verwendet (Abb. 5 a-b). Die Parametrierung erfolgt zur Laufzeit durch Auswertung der Datenbanksignaturen. Zur Vereinfachung wird sowohl die Plateaubreite als auch der Verfall der Zugehörigkeitsfunktionen über den Parameter  $\Delta x$  definiert.



**Abb. 5:** Zugehörigkeitsfunktionen in der a)  $\pi$ -Form und b) S-Form. c) Überlagerte Zugehörigkeitsfunktionen ( $\pi$ -Form) für ein Objekt (Mine) in verschiedenen Tiefen

Die „Fuzzyfizierung“ der Phasen- und (logarithmierten) Amplituden-Merkmale erfolgt über Zugehörigkeitsfunktionen in der  $\pi$ -Form. Dabei kennzeichnet jeweils  $x_0$  den aus einer Referenz-Signatur (Datenbank) extrahierten exakten Wert der Merkmalsgröße  $x$  für einen Minentyp bei einer Tiefe. Zusätzlich wird der Parameter  $\Delta x$  unter Berücksichtigung aller Signaturen eines Minentyps ermittelt, sodass die Vereinigungsmenge aller (gleitend überlappenden) Zugehörigkeitsfunktionen für das betrachtete Merkmal im Intervall zwischen minimaler und maximaler Verlegetiefe den Wert 1 annimmt (Abb. 5 c).

Der dritte Merkmalstyp, die Schleifenbreite, eignet sich als Ausschlusskriterium für Signaturen, mit einer deutlich schmaleren Schleifenform als die der gesuchten Mine. Eine erhöhte Schleifenbreite kann hingegen auch durch überlagerte Störeinflüsse verursacht werden und ist damit kein zuverlässiges Indiz zum Ausschluss einer Mine. Für das Merkmal Schleifenbreite wird daher eine Zugehörigkeitsfunktion der S-Form gewählt.

Nach dem beschriebenen Verfahren wird zu jedem Merkmal in Bezug auf jedes Objekt in der Datenbank eine Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_{i,j,k}$  aufgestellt. (Dabei indiziert:  $i$  den Minentyp,  $j$  die Variationen eines Minentyps (Tiefe, Orientierung) in der Datenbank und  $k$  das verwendete Merkmal (Phasenwerte, Amplitude,...). Die Anzahl der Minentypen, deren Variationen und die Merkmalsgrößen werden nachfolgend mit  $I$ ,  $J$  und  $K$  bezeichnet. Durch Einsetzen der einzelnen Merkmale einer im Feld vermessenen (unbekannten) Signatur in die entsprechenden Zugehörigkeitsfunktionen erhält man für jede Merkmalsgröße  $x_k$  den Zugehörigkeitswert  $\mu_{i,j,k}(x_k)$ , bezogen auf das Objekt  $X_{i,j}$  der Signaturdatenbank.

### 3.3. Fuzzy-Interferenz: Regelbasiertes Schließen mit „unscharfen“ Aussagen

Der Kern eines Fuzzy-Klassifikators ist die Regelbasis, mit welcher durch logische Verknüpfung der einzelnen Zugehörigkeitswerte (Prämissen) eine Schlussfolgerung (Klassen-zugehörigkeit) getroffen wird. Dieser Vorgang wird als Fuzzy-Interferenz bezeichnet.

Im ersten Schritt wird aus den Zugehörigkeitswerten  $\mu_{i,j,1..K}$  der einzelnen Merkmalsgrößen für jedes Objekt  $X_{i,j}$  der Signaturdatenbank die Interferenz  $y_{i,j}$  durch eine Fuzzy-UND-Verknüpfung berechnet (6).

$$y_{i,j}(\mathbf{x}) = \mu_{i,j,1}(x_1) \wedge \dots \wedge \mu_{i,j,K}(x_K) = \min[\mu_{i,j,1}(x_1), \dots, \mu_{i,j,K}(x_K)] \quad (6)$$

Die Signaturen für jeden Minentyp werden zunächst bei verschiedenen Tiefen und Orientierungen separat betrachtet. Die Anzahl zu berechnender Interferenzen entspricht damit der Anzahl der in der Minendatenbank enthaltenen Signaturen. Im zweiten Schritt werden die aus (6) resultierenden Interferenzen  $y_{i,j}$  für alle Variationen  $j = \{1, 2, \dots, J\}$  des jeweiligen Minentyps  $i$  Fuzzy-ODER verknüpft (7).

$$y_i(\mathbf{x}) = y_{i,1}(\mathbf{x}) \vee \dots \vee y_{i,J}(\mathbf{x}) = \max[y_{i,1}(\mathbf{x}), \dots, y_{i,J}(\mathbf{x})] \quad (7)$$

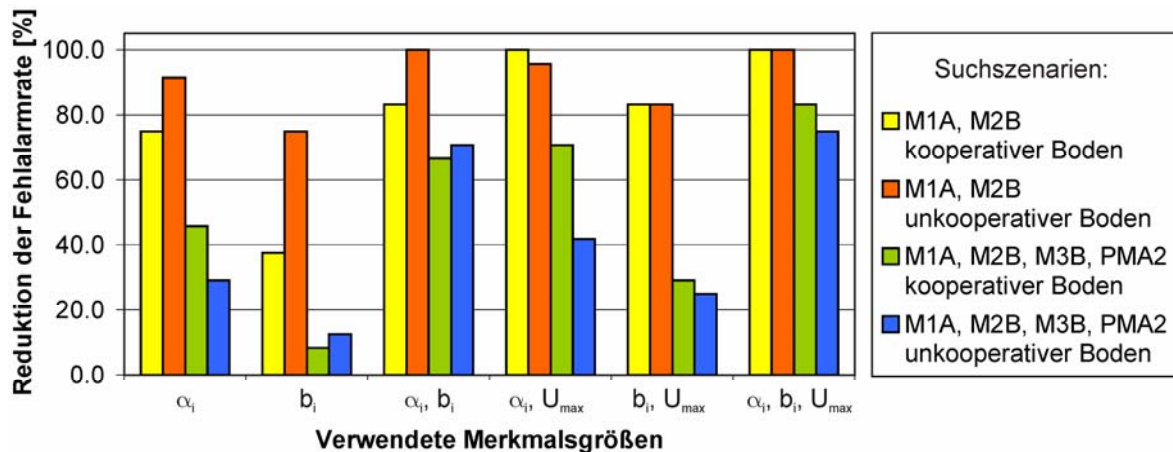
Der Interferenzwert  $y_i$  ist die „unscharfe“ Aussage über die Zugehörigkeit des untersuchten Objekts zur Klasse  $C_i$  welche einen bestimmten Minentyp repräsentiert. Die Klasse der Clutterobjekte  $C_0$  umfasst alle Objekte, für welche keine der Aussagen von  $y_{1..I}$  zutreffend ist (8).

$$y_0(\mathbf{x}) = 1 - \max_{i=1..I} [y_i(\mathbf{x})] \quad (8)$$

### 3.4. Defuzzifizierung: „scharfe“ Klassenzuordnung

Die abschließende „scharfe“ Klassenzuordnung erfolgt durch den Vorgang der „Defuzzifizierung“. Das unbekannte Objekt wird als Mitglied der Klasse  $C_i$  mit dem höchsten zugehörigen Interferenzwert  $y_i$  eingeordnet (Maximum-Methode).

Abb. 6 zeigt die Auswertung der Signaturen von 24 Clutterobjekten unter Berücksichtigung eines „kooperativen“ Sandbodens und (stark) „unkooperativen“ Lateritbodens. Die prozentuale Reduktion der Fehlalarmrate bezieht sich auf die Anzeigen eines Detektors ohne Objektklassifikation (100% → kein Fehlalarm).



**Abb. 6:** Reduktion der Fehlalarmrate durch verschiedene Merkmalskombinationen  $\alpha_i, b_i, U_{\max}$  (GMBV-abhängig mit  $i = \{1\}, \{1; 2\}, \{1; 2; 3\}$ ) im Vergleich zu einem Metalldetektor ohne Klassifikation.



Wie aus Abb. 6 ersichtlich, ist die Reduktion der Fehlalarmrate um so höher je mehr Merkmalsgrößen im Klassifikationsalgorithmus einbezogen werden. Sie verschlechtert sich erwartungsgemäß mit zunehmender Anzahl gleichzeitig gesuchter Minen. Die Eingrenzung der Anzahl möglicher Minentypen durch a-priori-Wissen ist eine Grundvoraussetzung zur Senkung der Fehlalarmrate mittels Objektklassifikation.

#### **4. Zusammenfassung und Ausblick**

Das Hauptproblem aller derzeit bei der Minensuche eingesetzten Metalldetektoren ist die hohe Fehlalarmrate in Anwesenheit unkooperativer Böden und harmloser Metallfragmente (Clutter). Es wurde gezeigt, dass bereits durch eine verbesserte Signalverarbeitung (Nutzung von a-priori Informationen, merkmalserhaltende Bodenkompensation und Klassifikation) die Fehlalarmrate um >80% reduziert werden kann. Dabei werden Minen mit hohem bis mittleren Metallgehalt sicher erkannt. Problematisch sind mit derzeitigen Detektoren Minen mit sehr geringen Metallgehalt welche nur Oberflächennah (bis 5 cm) sicher klassifizierbar sind. Außerdem verbleibt das Problem so genannter Multi-Target-Situationen, wo eine Clutterobjekt direkt neben einer Mine deren Signatur derart verfälscht, dass diese vom Klassifikator nicht erkannt wird. Ein Ansatz zur Erkennung solcher Multi-Target-Situationen durch Bildrekonstruktionsverfahren auf Grundlage 2D-ortsaufgelöster Sensordaten wird in [4] beschrieben. Jedoch sind heutige, allein auf die Detektion spezialisierte, Metalldetektoren weder für die abbildenden noch für die klassifizierenden Verfahren optimal.

Zusätzliches Potential besteht insbesondere in der Optimierung der Spulenordnung z.B. durch Einsatz räumlich versetzter Sender-Empfänger-Anordnungen (multi-statische Spulenordnung) statt der bisher verwendeten monostatischen Spulenordnung. Speziell ist zu untersuchen, wie optimale Sender-Empfänger-Anordnungen zum einen für eine bessere Objektrennung (Bildgebung / Multi-Target-Erkennung) und zum anderen zur Erhöhung des Merkmalsgehalts (Klassifikation), insbesondere für kleine, tief liegende Objekte, zu konstruieren sind und wie die Algorithmen der Signalverarbeitung (Bodenkompensation, Bildgebung und Klassifikation) für diese zu erweitern sind.

#### **Referenzen**

- [1] Osterloh, K.; Müller, C.; Ewert, U.: Bedrohung durch Minen – können zerstörungsfreie Prüfmethode zur Beseitigung beitragen?. ZfP-Zeitung Vol. 82, 2002, S. 34-40
- [2] Igel, J.; Preetz, H.: Elektromagnetische Bodenparameter und ihre Abhängigkeit von den Bodeneigenschaften - Zwischenbericht Projektverbund Humanitäres Minenräumen (Humin-MD), Hannover, 2005
- [3] Simoncelli, E. P.: Least Squares Optimization. Center for Neural Science - New York University, (<http://www.cns.nyu.edu/~eero/NOTES/leastSquares.pdf>), 2004
- [4] Krüger, H.: Bildgebung und Klassifikation von Signalen induktiver Metalldetektoren zur Anwendung in der humanitären Minensuche. Dissertation - Universität Rostock, Mensch und Buch Verlag - Berlin 2010, ISBN: 978-3866647640, S. 143
- [5] Krüger, H.; Ewald, H.: Signal Processing and Pattern Recognition for eddy current sensors, used for effective land-mine detection. AIS-2011 - International Conference on Autonomous and Intelligent Systems, Burnaby, BC, Canada, 2011