



## **Abschlussbericht**

Projektverbund „Metalldetektoren für Humanitäres Minenräumen  
– Entwicklungspotenziale für Datenanalyse und Messtechnik:  
Teilprojekt Verbund-Koordination; modellbasierte Objekt-  
Klassifikation; Orts- und Lage-Bestimmung"

ZE: Fraunhofer IPA	FKZ: 01 RX 0308
Vorhabenbezeichnung: HuMin/MD	
Laufzeit:	1.9.2003 – 31.10.2007

**bearbeitet von:**

Dipl.-Phys. Hartmut Eigenbrod

**bearbeitet am:**

Fraunhofer Institut für  
Produktionstechnik und Automatisierung,  
Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Stuttgart, 26.3.2008

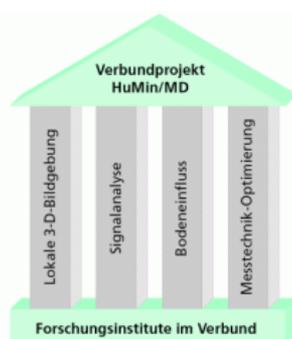
# 1 Aufgabenstellung

## 1.1 Hintergrund

Als Hinterlassenschaften bewaffneter Konflikte gefährden Landminen in vielen Ländern die Bevölkerung. Die rasche und vollständige Beseitigung der weltweit etwa 100 Millionen vergrabenen Landminen ist eine große technische Herausforderung. Das in der Praxis des Humanitären Minenräumens gegenwärtig am häufigsten eingesetzte Gerät ist der Metalldetektor; diese Geräteklasse weist jedoch, bedingt durch allgegenwärtig im Boden befindliche Metallteile, eine hohe Falschalarmrate auf.

## 1.2 Gesamtziel des Vorhabens

Das Gesamtziel des Vorhabens und somit die Zielsetzung des Projektverbunds HuMin/MD ist es, die hohen Falschalarmraten beim Einsatz von Metalldetektoren zum Humanitären Minenräumen zu reduzieren. Dazu hat der Projektverbund das Potenzial nachgeschalteter mathematischer Methoden zur Analyse der von Metalldetektoren konventioneller Bauart gelieferten Messdaten herausgearbeitet. Zur Erreichung des Gesamtziels wurden parallel zwei methodische Ansätze verfolgt: (1) Lokale 3D-Bildgebung und (2) Signalanalyse. Darüber hinaus wurden ergänzende Arbeiten zum Bodeneinfluss und zur Messtechnik-Optimierung durchgeführt (vgl. Abbildung 1). Grundlegende technische Modifikationen an herkömmlichen Metalldetektoren waren explizit nicht Gegenstand dieses Vorhabens.



*Clausthaler Umwelttechnik-Institut (CUTEC)  
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart  
Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP), Saarbrücken  
Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben (GGA), Hannover  
Universität Göttingen, Institut für Numerische und Angewandte Mathematik  
Universität Karlsruhe, Mathematisches Institut II  
Universität Köln, Institut für Geophysik und Meteorologie (zusammen mit  
Harbourdom GmbH, Köln, Universität Bonn, Geologisches Institut, und Universität  
Braunschweig, Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik))  
Universität Mainz, Arbeitsgruppe Numerische Mathematik  
Universität Rostock, Institut für Allgemeine Elektrotechnik  
Universität des Saarlandes, Institut für Angewandte Mathematik*

Abbildung 1: Schwerpunkte im Vorhaben und Projektpartner

### 1.3 Schwerpunkte im Vorhaben

Die **lokale 3D-Bildgebung** hat zum Ziel, ausgehend von Messungen mit Metalldetektoren an verschiedenen Orten, die genaue räumliche Metallverteilung im Boden unter Berücksichtigung der Maxwell'schen Gleichungen zu rekonstruieren. Dazu wurden etablierte Verfahren der lokalen 3D-Bildgebung und der Tomographie an die Gegebenheiten beim Humanitären Minensuchen angepasst, was insbesondere die Adaption an elektromagnetische Induktionsdaten wie auch die Berücksichtigung der räumlichen Rahmenbedingungen (Messungen nur oberhalb des Bodens) umfasste. Grundsätzlich wurden zwei verschiedene Herangehensweisen entwickelt: Zum einen direkte Inversionsverfahren mit mathematischen Algorithmen, wie beispielsweise die Linear-Sampling-Methode, die Faktorisierungsmethode und die Punktquellenmethode. Zum anderen kamen Verfahren auf Basis von schnellen Vorwärtsrechnungen zum Einsatz, die über einen iterativen Soll-Ist-Abgleich zum Ergebnis führen.

Die Auswertung der Signale mit Methoden der **Signalanalyse** hat zum Ziel, wiederkehrende Muster in den Signalen der Metalldetektoren ausfindig zu machen, um auf diese Weise die Minensignaturen besser als bisher von Signaturen anderer verborgener Gegenstände zu unterscheiden. Dabei wurde untersucht, inwieweit dem Minensucher vor Ort weitere Informationen zur Verfügung gestellt werden können, wie beispielsweise Metallsorte, Vergrabungstiefe, etc. Es wurden dabei moderne Konzepte der Merkmalsextraktion und -klassifikation zum Einsatz gebracht, wie beispielsweise Support-Vektor-Maschinen, Neuronale Netzwerke oder Bayes-Klassifikatoren; verschiedene phänomenologische und physikalische Zusammenhänge wurden bei der Implementierung ebenfalls berücksichtigt. Darüber hinaus wurden auch Arbeiten zur Vorverarbeitung der Daten (z. B. Rauschbefreiung) durchgeführt.

Im Hinblick auf den **Bodeneinfluss** ist bekannt, dass die elektromagnetischen Eigenschaften des Bodens (beispielsweise die magnetische Suszeptibilität oder die elektrische Leitfähigkeit) die Messsignale beeinflussen können. Innerhalb des Projektverbunds wurden daher quantitative Untersuchungen zu diesem Thema durchgeführt. – Im Bereich der **Messtechnik-Optimierung** wurde untersucht, ob sich durch einfache Hardware-Ergänzungen an herkömmlichen Metalldetektoren orts aufgelöste Messdaten beschaffen lassen. Im Vergleich zu reinen Zeitreihen ist eine Klassifikation mit derartigen Daten leichter zu bewerkstelligen. Darüber hinaus war es Ziel des Projektverbunds, Optimierungsmöglichkeiten im Design von Metalldetektoren aufzuzeigen.

### 1.4 Teilziel des Fraunhofer IPA

Zur Erreichung der Gesamtziele des Vorhabens hatten sich mehrere Institute zu einem Verbund zusammengeschlossen. Innerhalb dieses Verbundes verfolgte das Fraunho-

fer IPA Teilziele in den Bereichen „Signalanalyse“ und „Messtechnik-Optimierung“, die im Folgenden beschrieben werden.

Im Bereich der **Signalanalyse** leistete das Fraunhofer IPA mit zwei Arbeitszielen einen eigenen, spezifischen Beitrag zur Verringerung der hohen Falschalarmrate bei den Metalldetektoren. Zum einen wurden neue phänomenologische bzw. physikalische Modelle für den Vorgang des Humanitären Minenräumens entwickelt, um Zusammenhänge zwischen den Sensordaten und den Minenparametern (wie beispielsweise der Vergrabungstiefe) aufzeigen zu können. Zum anderen wurde ein modellbasierter Klassifikator entwickelt, mit dem bei verborgenen Metallgegenständen eine verbesserte Unterscheidung zwischen „ist möglicherweise eine Mine / ist sicher keine Mine“ möglich ist. Beide Arbeitsziele waren eng miteinander verzahnt.

Bei der Entwicklung neuer phänomenologischer bzw. physikalischer Modelle werden Zusammenhänge zwischen Sensordaten, davon abgeleiteten Merkmalen und den Eigenschaften verborgener Metallobjekte in mathematische Formeln gefasst. Die Entwicklung der Modelle basiert auf Messdaten, die in kontrollierten, wissenschaftlichen Messreihen erfasst werden; die auf diese Weise erstellten Modelle ermöglichen in unbekanntem Terrain quantitative Aussagen über die im Boden verborgenen Metallobjekte.

Ein modellbasierter Klassifikator macht Aussagen darüber, zu welcher Klasse von Objekten ein verborgener Metallgegenstand gehört. Er berücksichtigt dabei neben den Messsignalen und davon abgeleiteten Merkmalen auch Zusammenhänge zwischen diesen Größen, die in Form eines Modells beschrieben sind. Der Klassifikator wird zunächst mit Daten aus wissenschaftlichen Messreihen eingelernt, bei denen das gewünschte Klassifikationsergebnis bekannt ist; nach der Einlernphase werden Metallgegenstände dann auch in neuen, unbekanntem Situationen klassifiziert.

Ein modellbasierter Klassifikator weist gegenüber einem rein statistischen Klassifikator den Vorteil auf, dass er mit vergleichsweise wenigen Datensätzen eingelernt werden kann und dabei dennoch – aufgrund der zusätzlichen Informationen aus den Modellen – auch bei Parametern mit einer großen Variationsbreite verlässliche Klassifikationen ermöglicht. Aus diesem Grund ist ein solcher Klassifikator besonders gut für das Humanitäre Minenräumen geeignet, bei dem sehr verschiedene klimatische und geologische Bedingungen auftreten können.

Im Bereich der **Messtechnik-Optimierung** war es das Ziel des Fraunhofer IPA, herkömmliche Metalldetektoren mit einem zusätzlichen Sensor zu kombinieren, mit dem sich Ort und Lage des Metalldetektors bestimmen lassen. Ein solcher zusätzlicher Sensor wäre in der Lage, zu jedem Induktionsmesssignal jeweils drei Werte zum Ort und zur Lage des Detektors zu liefern. Das ursprünglich n-dimensionale Messsignal kann auf diese Weise zu einem (n+6)-dimensionalen Signal erweitert werden. Das Mehr an

Daten lässt verbesserte Klassifikationsergebnisse des eigenen modellbasierten Klassifikators erwarten.

Das Fraunhofer IPA übernahm des Weiteren die **Koordination des Projektverbunds**. Die Arbeiten dazu umfassten insbesondere auch die Einbindung von externen Kooperationspartnern.

## 2 Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens

Wesentliche Voraussetzung für die Durchführung des Vorhabens war die Verfügbarkeit von kommerziellen Metalldetektoren mit einem Signalabgriff direkt an den Suchspulen. Metalldetektoren für das Humanitäre Minensuchen sind auf dem freien Markt verfügbar, und somit konnte der Projektverbund direkt zu Projektbeginn Metalldetektoren der Firmen Vallon, Ebinger und Förster erwerben. Dankenswerter Weise statteten die drei Firmen die erworbenen Metalldetektoren zudem mit einem speziellen, geeigneten Signalabgriff für den Verbund aus. Auf eigene Anpassungen durch den Projektverbund konnte daher verzichtet werden.

Durch die Verwendung von kommerziellen Metalldetektoren konnte prinzipiell auf deren optimiertes Spulendesign zurückgegriffen werden, und somit eine optimale Datenbasis als Ausgangspunkt erzielt werden. Die Signale am beschriebenen Signalabgriff bilden die Datengrundlage für nachfolgende Auswertungen, wofür das Fraunhofer IPA im weiteren Verlauf des Projekts verschiedene neue Verfahren entwickelt hat.

## 3 Planung und Ablauf des Vorhabens

### 3.1 Eingliederung in den Projektverbund HuMin/MD

Während der Planungsphase zum Projektverbund wurden zwei Meilensteine definiert, um einen engen Bezug der einzelnen Vorhaben zur Praxis zu gewährleisten. Zum Meilenstein am 30.6.2005 hatten die Teilprojekte der lokalen 3D-Bildgebung bzw. der Tomographie anhand synthetischer Daten den Nachweis zu erbringen, dass die neu entwickelten Verfahren ein ausreichendes Leistungspotential aufweisen. Zum Meilenstein

am 31.12.2005 wurde anhand von gemessenen Metalldetektordaten ein analoger Nachweis von den Teilprojekten der Signalanalyse erbracht. Beide Meilensteine wurden von den jeweiligen Projektpartnern erfolgreich bestanden. Die Begutachtung erfolgte durch ein Gutachtergremium mit Repräsentanz aller verbundrelevanten Disziplinen (inkl. der Minensuch-Praxis).

Bei der Planung wurde von Beginn auf eine enge inhaltliche Abstimmung der einzelnen Vorhaben geachtet, und diese auch in einem Rahmenplan dokumentiert. Ein besonderes Augenmerk wurde dabei auf den inhaltlichen Austausch zwischen den beiden Schwerpunkten lokale 3D-Bildgebung und Signalanalyse gelegt.

Nach Beginn des Vorhabens erarbeiteten die Projektpartner im Rahmen der jeweiligen Arbeitspakete Beiträge zum Gesamtvorhaben. Zur Abstimmung der Zusammenarbeiten fanden regelmäßig Treffen für den gesamten Verbund (alle zwölf Monate) sowie in den etablierten Schwerpunkten (alle sechs Monate) statt. Dabei wurden insbesondere auch Aktivitäten zur zentralen Bereitstellung von Daten vereinbart.

Bei der zentralen Bereitstellung von Daten konnte im Verbund eine effektive Arbeitsteilung erzielt werden, und damit der Bereich reale Metalldetektor-Messdaten, synthetische Messdaten, Geräteparameter und Bodenparameter abgedeckt werden. Einige der Aktivitäten in diesem Bereich sind in Abbildung 2 dargestellt.

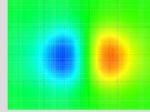
Aspekt	Status	
Reale Messdaten	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Aufbau und Betrieb eines Versuchsfeld mit zwei Böden zur kontinuierlichen Bereitstellung von Daten (Univ. Rostock)</li> <li>→ Drei Messkampagnen in Ispra für Bereitstellung realer Messdaten (4 Böden, diverse Messobjekte) (FhG-IZFP)</li> </ul>	
Synth. Messdaten	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Bereitstellung von diversen synthetischen Datensätzen <ul style="list-style-type: none"> <li>- Konfigurationen mit analytischer Lösung (Univ. Köln)</li> <li>- FIT-Methode (Univ. Rostock)</li> <li>- Integralgleichungsmethode (Univ. Göttingen)</li> </ul> </li> </ul>	
Geräteparameter	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Erstellung von Geräteparameter-Listen in Kooperation mit MD-Herstellern (Harbourdom)</li> <li>→ Messungen an den Detektoren (FhG-IZFP)</li> </ul>	
Bodeneinfluss	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Untersuchung des Bodeneinflusses an Referenzfl. (GGA)</li> <li>→ Auswahl von Böden für das Versuchsfeld Rostock (GGA)</li> </ul>	

Abbildung 2: Zentrale Aspekte der Datenbereitstellung

## 3.2 Planung und Ablauf des Vorhabens am Fraunhofer IPA

### 3.2.1 Arbeitspaket S: Modelle zum Minenräumen und modellbasierte Klassifikation

Für die Erreichung der beiden Ziele, der Entwicklung von phänomenologischen bzw. physikalischen Modellen zum Humanitären Minenräumen und der Entwicklung eines modellbasierten Klassifikators, wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

**(1) Analysephase:** Zu Beginn der Förderperiode wurde zunächst analysiert, welche wissenschaftlichen und technischen Arbeiten zu den geplanten Entwicklungszielen bereits von anderen Forschungsinstituten erbracht wurden. Zu diesem Zweck wurde die Literatur zur Modellierung von phänomenologischen bzw. physikalischen Zusammenhängen sowie zur Klassifikation im Bereich Humanitäres Minenräumen ausgewertet. Darüber hinaus wurde analysiert, wie leistungsfähig verschiedene Metalldetektoren sind und was typische Observablen sind. Die Sensordaten aus bereits durchgeführten Messungen, wie sie beispielsweise aus dem Projekt „Mult-Sensor Mine Signature“ (kurz: MsMs-Projekt) oder auch aus anderen Quellen vorliegen, wurden begutachtet.

**(2) Konzeptionsphase:** In der Konzeptionsphase wurde erarbeitet, in welchen Bereichen das Fraunhofer IPA neue phänomenologische bzw. physikalische Modelle im Rahmen dieses Projektes (weiter-)entwickeln würde. Mit diesen Arbeiten wurde in dieser Phase bereits begonnen, und zwar auf Basis von theoretischen Betrachtungen bzw. auf Basis von bereits vorliegenden, externen Daten (MsMs-Projekt etc.).

**(3) Entwicklungsphase:** Das Ziel dieser Phase war die Entwicklung neuer phänomenologischer und physikalischer Modelle sowie die Entwicklung eines modellbasierten Klassifikators. Die beiden Entwicklungen wurden parallel nebeneinander durchgeführt; es fand eine enge Verzahnung zwischen ihnen statt. Neue dabei auftretenden Teilergebnisse fanden i.d.R. Eingang in beide Entwicklungen; somit wurde ein kontinuierlicher, iterativer Verbesserungsprozess realisiert.

Die Entwicklungsphase basierte auf vorliegenden eigenen Messsignalen des Projektverbunds, wie sie von den anderen Teilprojekten (speziell Universität Rostock und Fraunhofer IZFP) zur Verfügung gestellt wurden.

Bei der Entwicklung der Modelle durch das Fraunhofer IPA wurde zunächst einfachen Modellierungen der Vorzug gegeben; als erste, zu berücksichtigende Minenparameter wurden beispielsweise die Phase oder die Vergrabungstiefe gewählt. Als Basis für die Untersuchungen wurden sowohl herkömmliche, zeitliche Messsignale von Metalldetektoren als auch orts aufgelösten Messsignale verwendet. Letztere ließen sich durch die Verwendung eines X-Y-Scanners im Labor sowie auch durch den Einsatz von Metalldetektoren im Feld erzeugen, wenn diese mit Sensoren zur Bestimmung von Ort und

Lage bestückt waren. Die Ergebnisse der Modellierung waren eine wichtige Grundlage für die Arbeiten anderer Verbundpartner und wurden diesen daher bereitgestellt.

Bei der Entwicklung des modellbasierten Klassifikator durch das Fraunhofer IPA wurden eigene phänomenologische bzw. physikalische Modelle sowie in der Fachliteratur beschriebene Zusammenhänge berücksichtigt. Die Auswahl des Klassifikationsprinzips wurde von der Art der vorliegenden Daten abhängig gemacht, um darauf basierend die am Fraunhofer IPA beherrschten Verfahren zum Einsatz zu bringen (wie beispielsweise Neuronale Netze, Bayes-Klassifikatoren, Hidden-Markov-Modelle, etc). Bei der Auswahl musste insbesondere berücksichtigt werden, dass die Klassifikation in Echtzeit möglich sein muss. Die Leistungsfähigkeit des modellbasierten Klassifikator wurde in einem Testfeld evaluiert.

**(4) Realisierungsphase:** Gemeinsam mit den Projektpartnern wurde während des Projektverlaufs abgestimmt, welche der Neuentwicklungen mit kommerziell erhältlichen Metalldetektoren kombiniert werden sollen. Das Ziel der Realisierungsphase war die Kombination von Algorithmen des Fraunhofer IPA mit einem kommerziell erhältlichen Metalldetektor und somit auch die Fortführung der Arbeiten der Entwicklungsphase.

**(5) Evaluations- und Dokumentationsphase:** Die Leistungsfähigkeit des entwickelten, modellbasierten Klassifikators wurde in einem Versuchsfeld mit unbekannter Konfiguration evaluiert. Die Evaluation fand dabei unter realitätsnahen Bedingungen auf einem Übungsgelände in Benkovac, Kroatien, statt.

### 3.2.2 Arbeitspaket M: Ortsaufgelöste Messdaten von tragbaren Metalldetektoren

Ausgangspunkt für die Arbeiten des Fraunhofer IPA waren Sensorsysteme, wie sie im Bereich der virtuellen Realität eingesetzt werden. Während der Konzeptionsphase wurde besonders darauf geachtet, dass keine Wechselwirkungen zum elektromagnetischen Messprozess auftraten. Die Sensoren mussten zudem leicht und sparsam im Energieverbrauch sein.

Zu Beginn der Analysephase wurde eine Recherche zu kommerziell erhältlichen Sensorsystemen für eine Ort- und Lagebestimmung durchgeführt; ein besonderer Schwerpunkt lag dabei auf Beschleunigungssensoren in klassischer und MEMS-Ausführung. Gemeinsam mit den anderen Verbundpartnern wurden Genauigkeitsanforderungen für die Orts- und Lagebestimmung definiert.

Bei der Verwendung eines Beschleunigungssensors war zu berücksichtigen, dass derartige Messdaten generell nur in einem gewissen Zeitintervall (beispielsweise beim Umkreisen eines fraglichen Metallobjekts) ausreichend genau sein können. Mögliche Einbindungen des Benutzers im Feld wurden mit Praktikern aus dem Bereich des Minensuchens besprochen.

### **3.3 Arbeitspaket K bzw. E1-E4: Koordination des Projektverbunds und Einbindung externer Kooperationspartner**

Das Fraunhofer IPA war für koordinierende Aktivitäten innerhalb des Projektverbunds zuständig. Die Koordination des Projektverbunds umfasste grundsätzlich eine Reihe von Arbeiten, die sich zu folgenden Schwerpunkten zusammenfassen lassen: Förderung der Verbundziele, Unterstützung der Kommunikation zwischen den Verbundpartnern, Koordination zentraler Aufgaben innerhalb des Verbundes, Repräsentation des Verbundes nach außen sowie Dokumentation der Verbundaktivitäten.

Eine weitere wesentliche Aufgabe im Bereich der Verbundkoordination war die Einbindung von externen Kooperationspartnern. Dies umfasste Kooperationen mit Beratern zum Thema „Humanitäres Minenräumen“, die Zusammenarbeit mit Metalldetektor-Herstellern und die vertragliche Ausgestaltung für die Benutzung von externen Versuchsfeldern.

## **4 Wissenschaftlicher und technischer Stand**

Die Analyse von mehrdimensionalen Zeitreihen ist ein typisches Einsatzgebiet der Signalanalyse. Auch im Bereich des Humanitären Minenräumens gibt es mehrere wissenschaftliche Arbeiten zur Merkmalsextraktion und –klassifikation von Metalldetektordaten, vgl. [SA1-SA3]. In aktuellen Forschungsarbeiten werden vermehrt modellbasierte Klassifikatoren beschrieben, die aufgrund der zusätzlichen Informationen durch phänomenologische bzw. physikalische Modellen eine verringerte Falschalarmrate erwarten lassen. Als Beispiel für ein solches Modell sei folgender Zusammenhang bei Metalldetektoren mit gepulster Anregung genannt: Das gemessene Induktions-Signal lässt sich als Summe von Exponential-Funktionen modellieren, deren Abklingraten in engem Zusammenhang zur Größe des Metallobjekts stehen [SA2]. In einer anderen Arbeit wurde der Einfluss des Bodens auf den Minensuchprozess modelliert; auch in diesem Fall lässt sich mit einem geeigneten Detektor eine Verringerung der Falschalarmrate erwarten [SA4]. Weitere Fortschritte sind denkbar, wenn man zudem ortaufgelöste Messdaten zur Verfügung hat (vgl. ebenfalls [SA4], S.90).

Die Bestimmung von Ort und Lage des Metalldetektors stellt eine einfache Optimierung des Messprozesses dar, die aber dennoch wichtige Zusatzinformationen liefert. Zum Zwecke der Objektlokalisierung stehen heutzutage eine Reihe von leichten und zuverlässigen Sensoren zur Verfügung [OL1]. Die Sensoren basieren auf diversen physikalischen Prinzipien, die für einen Einsatz beim Humanitären Minenräumen unterschiedliche gut geeignet sind: Magnetische Verfahren kommen beispielsweise nicht in Frage,

da sie den Messprozess des Minensuchens beeinflussen; optische Systeme sind ebenfalls wenig geeignet, da sie immer ein Referenzsystem benötigen, dessen Bereitstellung im Feld i.d.R. nicht möglich ist. Besser geeignet sind hingegen Beschleunigungssensoren. Diese Sensoren können zwar die Positionen und Lage nur über eine zweifache Integration der Beschleunigungsdaten bestimmen; dafür sind sie aber nicht auf ein externes Bezugssystem angewiesen.

Moderne Beschleunigungssensoren werden als mikroelektromechanischen System (MEMS) realisiert, und sind gerade intensiver Gegenstand aktueller Forschungen, vgl z.B. [OL2]. Aufgrund ihrer geringen Abmessungen und ihrer Zuverlässigkeit finden sie insbesondere in der Automobilindustrie eine weite Verbreitung (ESP, Airbagauslösung, etc).

Literatur zum Stand der Technik:

- [SA1] Collins, L., et al., "A statistical approach to landmine detection using broadband electromagnetic data.", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 40 (2002) 950-962.
- [SA2] Tantum, S.L., Collins, L.M., "A comparison of algorithms for subsurface target detection and identification using time-domain electromagnetic induction data", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 39 (2001) 1299-1306.
- [SA3] Won, D.A., Keiswetter D.A., Bell, T.H., "Electromagnetic induction spectroscopy for clearing landmines", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 39 (2001) 703-709.
- [SA4] Dietrich, B., "Fähigkeiten eines Metalldetektors zur Parameterbestimmung und Objektdiskriminierung", Dissertation Universität Karlsruhe und Joint Research Center, 2002.
- [OL1] Project IRMA ("A Configurable Virtual Reality System for Multi-Purpose Industrial Manufacturing Applications"), Report on "Choice of Standard Software and Hardware", Published on <http://www.project-irma.co.uk>, 2003.
- [OL2] Handtmann, M.; Aigner, R.; Meckes, A.; Wachutka, G.: „Sensitivity Enhancement of MEMS inertial sensors using negative springs and active control. - In: Sensors and Actuators A: Physical A97-98 (2002) Special issue, p. 153-160.

## 5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Fraunhofer IPA hat sich zu Beginn der Projektarbeit intensiv mit anderen wissenschaftlichen Institutionen ausgetauscht, um so auch nicht dokumentierte Details zum Stand der Technik zu erfahren. In diesem Kontext gab es Treffen mit den Arbeitsgruppen an der Freien Universität Brüssel (Prof. Sahli) wie auch mit der Royal Academy in Brüssel (Prof. Acheroy), die sich mit dem Thematik beschäftigen. Darüber hinaus fand auch ein lebhafter Informationsaustausch mit Dr. Lewis vom JRC in Ispra statt.

Im weiteren Verlauf dieses Projekts fand ein kontinuierlicher Austausch mit diesen Wissenschaftlern statt, z.B. im Rahmen von Veranstaltungen der BAM in Berlin.

Die Durchführung der Arbeiten im Verbund fand generell in enger Kooperation mit verschiedenen Akteuren aus dem Bereich des Humanitären Minensuchens statt. Bei Aufgaben und Fragestellungen, die nicht Bestandteil dieses Vorhabens waren, die aber dennoch für die Bearbeitung des Vorhabens erforderlich waren, wurden Kooperationsvereinbarungen mit externen Institutionen abgeschlossen:

- Dr. Christina Müller, Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin:  
Kooperation in den Bereichen Berechnung »Ground Penetration Height« sowie statistische Bewertung zum Minensuchen (insbesondere im Hinblick auf das sog. modulare Reliability Modell)
- Dr. Adam Lewis, Dr. Alois Sieber, Joint Research Centre (JRC), ISPRA:  
Benutzung der Testflächen des JRC mit sieben verschiedenen Böden, über 300 vergrabenen Testobjekten und einem X-Y-Scanner für die Datenaufnahme.
- Dieter Guelle, Guelle Mine Action Consulting, Berlin:  
Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung einer Bodennesskampagne des GGA in Mozambique. Darstellung der Praxis des Humanitären Minensuchens.
- Nikola Pavkovic, CROMAC, Zagreb:  
Bereitstellung einer Testfläche in Benkovac, Kroatien, für die Evaluation der entwickelten Auswerteverfahren.

## 6 Erzielte Ergebnisse

### 6.1 Arbeitspaket S: Modelle zum Minenräumen und modellbasierte Klassifikation

Mit Methoden der Signalanalyse lassen sich wiederkehrende Muster in Datensätzen aufspüren und identifizieren. Das weit reichende Methodenspektrum dieser Disziplin lässt sich auf die unterschiedlichsten technischen Daten anwenden, insbesondere auch auf Induktionsmessdaten, die von Metalldetektoren im Feldeinsatz gemessen werden.

Der Arbeitsschwerpunkt in diesem Arbeitspaket lag in der Entwicklung von neuen Methoden zur Merkmalsextraktion und Merkmalsklassifikation. Das Fraunhofer IPA konnte dabei auf Daten von Messungen mit verschiedenen Metalldetektoren zurückgreifen, die innerhalb des Verbunds bereitgestellt wurden. Nach Absprache mit den Projektpartnern konzentrierten sich die weiteren Entwicklungen auf Detektoren mit harmonischer Anregung, die im Folgenden auch als CW-Metalldetektoren bezeichnet werden.

Zu Beginn der Arbeiten wurden eine Analyse- und Konzeptionsphase durchgeführt, in denen zunächst die einzelnen Bestandteile der prototypischen Signalanalysekette (siehe Abbildung 3, links) für die vorliegende Aufgabe des Minensuchens identifiziert wurden.

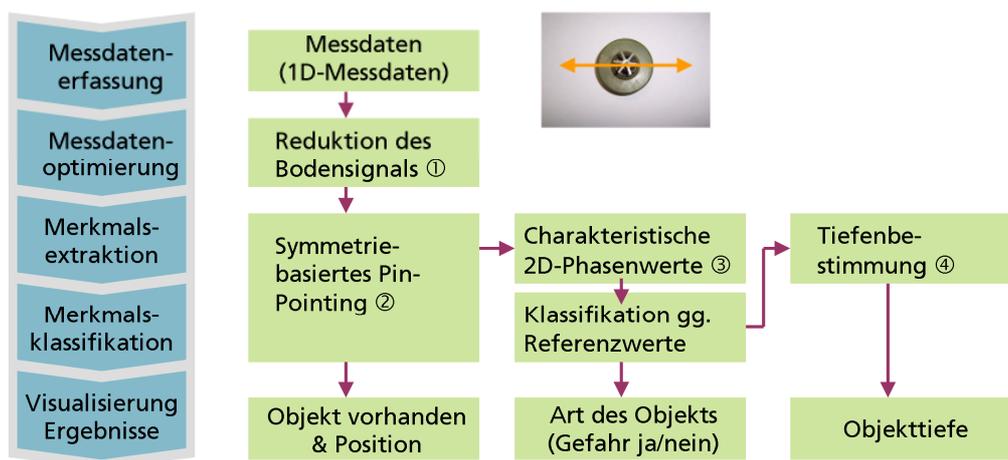


Abbildung 3: Algorithmische Neuentwicklungen des Fraunhofer IPA im Rahmen des Arbeitspakets S. Links dargestellt ist die typische Signalanalysekette (in blau), die ausgehend von Messdaten wesentliche, darin enthaltene Informationen ermittelt. Rechts dargestellt ist eine konkrete Realisierung der Signalanalysekette für den Fall des Humanitären Minensuchens, wie sie am Fraunhofer IPA entwickelt wurde.

Für die einzelnen Bestandteile der Signalanalysekette wurden am Fraunhofer IPA verschiedene Möglichkeiten für eine Verbesserung erarbeitet. Als Ergebnis ist rechts in Abbildung 3 ein verbessertes Ablaufdiagramm dargestellt. In diesem sind insbesondere vier algorithmische Auswerteblocks enthalten, die im Rahmen dieses Projekts neu- bzw. weiterentwickelt wurden. Die Konzepte der einzelnen Auswerteblocks werden in den folgenden Abschnitten genauer erläutert, ebenso wie die damit erzielten Verbesserungen für das Humanitäre Minensuchen.

Die neuen Algorithmen dienen sowohl dazu, das Minensuchen sicherer zu machen, durch Verbesserungen bei der Reduktion des Bodeneinflusses und beim Lokalisieren von Metallobjekten (dem sog. Pin-Pointing). Sie dienen des Weiteren auch dazu, das Minensuchen effizienter zu gestalten, indem dem Minensucher vor Ort zusätzliche Informationen zu einem fraglichen, vergrabenen Objekt bereitgestellt werden (zum Objekttyp wie auch zur Vergrabungstiefe, sofern sich diese Informationen aus den Messdaten extrahieren lassen).

### **6.1.1 Reduktion des Bodensignals**

In den Messdaten eines Metalldetektors zeichnen sich nicht nur die Antworten von verborgenen Metallobjekten ab, sondern auch der Einfluss von elektromagnetisch aktiven Bestandteilen im Boden. Beide Komponenten überlagern sich, wodurch die Signatur des eigentlichen Metallobjekts in der Regel verschlechtert wird. Das liegt nicht zuletzt darin begründet, dass Variabilitäten in der lokalen Bodenzusammensetzung einen zusätzlichen Rauschanteil in den Daten bedeuten, und somit das vorliegende SNR verschlechtern.

Eine Reduktion des Bodeneinflusses kann prinzipiell dann gelingen, wenn sich Metallobjekte und verschiedene Böden regelmäßig in Eigenschaften unterscheiden, die sich aus den Messdaten extrahieren lassen. Um einen entsprechenden Zusammenhang aufzuzeigen, wurden im Rahmen dieses Arbeitspakets sowohl Simulationsrechnungen zu Metallobjekten wie auch reale Messungen an verschiedenen Böden durchgeführt.

Als Ausgangspunkt dienten zunächst Reihenuntersuchungen, die am Fraunhofer IPA mit dem Simulationsprogramm »minex2df« des Projektpartners an der Universität Köln durchgeführt wurden. Mit diesem Programm lässt sich das Antwortverhalten von verschiedenen metallischen Kugeln simulieren, wobei verschiedene Parameter wie Kugelradius, elektromagnetische Eigenschaften der Kugel, Abstand zum Detektor usw. variiert werden können. Als Ergebnis erhält man die induzierten Spannungen in der Empfängerspule (mit Real- und Imaginärteil).

Ein wesentliches Ergebnis aus den Simulationen war, dass Quotienten aus verschiedenen Kombinationen von Messkanälen (Real- oder Imaginärteile für verschiedene Frequenzen) sich nicht ändern, wenn der Detektor über eine Kugel geschwenkt wird. Das bedeutet dass der Quotient unabhängig ist vom Offset zwischen dem Detektor und dem Metallobjekt; des Weiteren ist der Quotient auch unabhängig von der Tiefe des Objekts. Zeichnet man den berechneten Wert aus den Simulationsdaten in ein Diagramm mit prinzipiell möglichen Quotientenwerten ein, so ergibt sich ein scharfer Peak (rote Kurve in Abbildung 4). – Analoge Berechnungen wurden für Messdaten ausgeführt, die über einem Boden ohne verborgenes Metallobjekt aufgezeichnet wurden. Als Ergebnis erhält man eine breite Verteilung von Quotientenwerten (blaue Kurve in Abbildung 4).

Beide Verteilungen von Quotientenwerten unterscheiden sich deutlich im Hinblick auf die Lage des Maximums wie auch hinsichtlich der Breite der Verteilung.

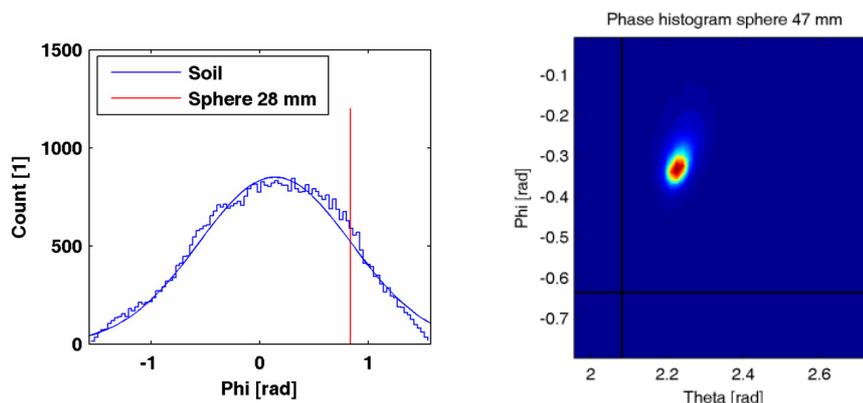


Abbildung 4: **Links:** Histogramm für ein Merkmal, das aus dem Quotienten von Real- und Imaginärteil einer komplexwertigen Induktionsantwort abgeleitet wurde (basierend auf Simulationsdaten bzw. echten Messdaten) **Rechts:** Histogramm (basierend auf zwei Phasenwerten) für ein vergrabenes Metallobjekt

Mit Methoden der multivariaten Datenanalyse kann der Unterschied in den Verteilungen ausgenutzt werden, um den Einfluss des Bodens zu reduzieren. Den Ausgangspunkt bilden dabei die Messdaten eines CW-Metalldetektors, der über zwei verschiedene Anregungsfrequenzen verfügt. Aus den vier Messkanälen (jeweils ein Real- und Imaginärteil zu den beiden Frequenzen) lassen sich nun verschiedene Quotienten bilden. In der konkreten Realisierung des Fraunhofer IPA werden zwei Quotienten berechnet, die sich alternativ auch als Phasenwerte (trigonometrische Transformation von Quotienten) darstellen lassen. Die Berechnung erfolgt dabei wie folgt:

Während der Bewegung werden kontinuierlich Messdaten  $d_i = (re1_i, re2_i, im1_i, im2_i)$  aufgezeichnet, mit einem fortlaufenden Index  $i$ . Jeder Datenvektor beinhaltet den Realteil (»re«) und den Imaginärteil (»im«) der Detektorantwort, für jede der beiden Fre-

quenzen  $f_1$  und  $f_2$  (markiert als »1« und »2«). Die Signale im Zentrum des Minensignals werden als Referenzwert gewählt, d.h. diese Werte werden von den eigentlichen Messsignalen subtrahiert, um auf diese Weise die Signalvektoren  $d_i$  zu erhalten. Nach einer Umsetzung der Daten in  $\tilde{d}_i = (re1_i, re2_i, (f_2/f_1) \cdot im1_i - im2_i)$  erfolgt eine Transformation der Datenvektoren in sphärische Koordinaten, d.h. man erhält Vektoren von der Art  $\hat{d}_i = (r_i, \theta_i, \varphi_i)$ . Um eindeutige Phasenwerte zu erzielen (im Kontext von komplexen Signalen), werden die zulässigen Werte für  $\theta_i$  und  $\varphi_i$  auf einen Halbraum beschränkt.

Das Ergebnis dieser Berechnungen für eine reale Messung an einem vergrabenen Minenobjekt ist in Abbildung 4, rechts, dargestellt. Die Verteilung ist in dem Beispiel aufgrund von verschiedenen störenden Einflüssen (Rauschen des Detektors, etc.) leicht aufgeweitet, aber immer noch eng lokalisiert. Parallel dazu wurde auch das Histogramm für ein Bodensegment ohne Metallobjekt ermittelt; das Maximum dieses Histogramm liegt im genannten Histogramm an den Kreuzungspunkten der beiden schwarzen Linien. Wie erwartet liegen die Maxima der beiden Messungen an verschiedenen Stellen.

Die Reduktion des Bodensignals kann nun in einem zweistufigen Prozess wie folgt vorgenommen werden:

- 1 **Geometrische Projektion:** Durch das Maximum im Histogramm des Bodens ohne Metallobjekt wird im Raum der Messwerte  $d_i$  eine Richtung definiert. Die Messwerte  $d_i$  werden auf orthogonale Ebenen senkrecht zu dieser Richtung projiziert. Die Reduktion des Messwertraums wird durch diese Maßnahme um eine Dimension reduziert.
- 2 **Principal Component Analyse (PCA):** In einem nachfolgenden Schritt wird in den verbliebenen Messdaten eine PCA durchgeführt, um so den Objektcontrast in den Messdaten zu erhöhen. Bei Messdaten aus einem Zweifrequenz-Metalldetektor wird nur die Komponente mit der höchsten Varianz weiter berücksichtigt; bei Metalldetektoren mit mehreren Anregungsfrequenzen können auch mehrere Komponenten verbleiben.

Das Verfahren zur Reduktion des Bodeneinflusses ist besonders dann wirksam, wenn sich die Signale des Messobjekts nur noch schwach in den Messdaten abzeichnen, wie dies beispielsweise in Abbildung 5 dargestellt ist. Mit einem Metalldetektor in Doppel-D-Geometrie wurden flächig Messdaten zu einer kleinen Metallkugel aufgenommen, die in verschiedenen Tiefen auf dem Versuchsfeld beim Projektpartner in Rostock vergraben wurde. In der Darstellung der Original- Datensätze (in der Abbildung links) befindet sich das Zentrum der Kugel jeweils in der Mitte der Datensätze. Während bei der Tiefe von 120 mm die typische Signatur eines Metallobjekts noch gut zu erkennen ist, lässt sich diese bei 160 mm allenfalls noch erahnen.

Bereits durch die geometrische Projektion lässt sich eine Verbesserung der Messdaten erzielen, wie dies insbesondere bei der Kugel in 120 mm Tiefe ersichtlich wird (deutlich-

cher hervortretende Signatur). Durch eine sequentielle Ausführung von Projektion und PCA kann schließlich auch die Signatur für die Kugel in 160 mm sichtbar gemacht werden, die zwar deutlich mit Rauschen belegt ist, nun aber zumindest durch Methoden des Pin-Pointing lokalisiert werden kann.

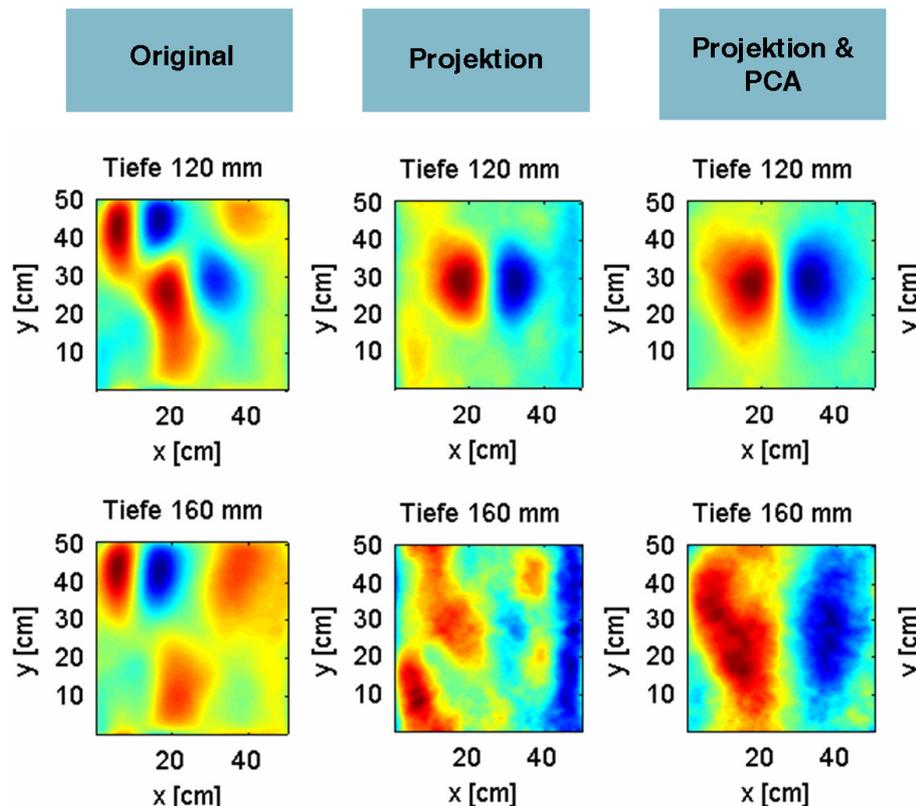


Abbildung 5: **Links:** Originale flächig aufgezeichnete Messdaten zu einer Stahlkugel in unterschiedlichen Tiefen. **Mitte:** Verbesserung der Daten nach Durchführung einer bodenspezifischen geometrischen Projektion. **Rechts:** Ergebnisse zur Bodenreduktion mit geometrischer Projektion und PCA.

Mit Hilfe der Bodenreduktion lassen sich insbesondere Metallobjekte nahe der Rauschgrenze zuverlässiger detektieren als dies bisher möglich ist.

### 6.1.2 Symmetriebasiertes Pin-Pointing

Wenn zusätzlich zu den Induktionsdaten eines Metalldetektors auch noch Positionswerte aufgezeichnet werden, erhält man als erweiterten 2D-Datensatz die vollständige Trajektorie des Metalldetektors. Ein offensichtliches zusätzliches Merkmal in diesen Datensätzen ist die Symmetrie, die sich in den Induktionsdaten in der Umgebung um kleine metallische Objekte ergibt. In Abbildung 6 ist ein simulierter Datensatz für einen

CW-Metalldetektor mit Doppel-D-Geometrie dargestellt. Das Messsignal zu einem Objekt ist anti-symmetrisch bezüglich einer 180°-Drehung um das Zentrum des Objekts. Diese Art von Symmetrie findet man bei allen sphärischen Metallobjekten wie auch in guter Näherung bei allen anderen kleinen Metallobjekten vor. Vergleichbare Symmetrien treten auch bei Metalldetektoren mit elliptischem Spulendesign auf.

**Beschreibung des Algorithmus:** Der neue Algorithmus für automatisches Pin-Pointing erweitert den klassischen Schwellwert-Ansatz zum Auffinden von Metallobjekten, indem die vorliegende Symmetrie in den Datensätzen ausgewertet wird. Die Kombination der beiden Kriterien verbessert die Fähigkeit des Metalldetektors, kleine metallische Gegenstände zu finden, wie dies im Weiteren im Detail dargestellt wird.

Ein Algorithmus zum Auffinden von Symmetrien muss bei einer Anwendung im Bereich des Humanitären Minensuchens folgende beiden Eigenschaften aufweisen: Zum einen muss er die Symmetrien unabhängig vom Kontrast in den Datensätzen finden, um so bei verschiedenen Vergrabungstiefen einsetzbar zu sein. Da die Signalstärke (für Induktionsmesswerte) aufgrund der Maxwell-Gleichungen bei zunehmender Tiefe mit der sechsten Potenz abnimmt, treten in der Signalstärke leicht Differenzen von  $10^3$  oder größer auf, wenn man die Signale zu flach bzw. tief vergrabene Metallobjekten miteinander vergleicht. Zum anderen muss der Algorithmus das Zentrum des vergrabenen Metallobjekts möglichst genau identifizieren. Nur auf diese Weise eignet sich der Algorithmus zur Ermittlung einer Referenzposition, bezüglich der alle weiteren Merkmale berechnet werden können (mit relativen Ortskoordinaten bzgl. der Referenzposition).

Der neue Algorithmus zum Auffinden von Symmetrien verwendet Metalldetektordaten auf einem regulären zweidimensionalen Messraster. Die Daten können dabei grundsätzlich sowohl von einem CW-Metalldetektor wie auch von einem PI-Metalldetektor stammen, sofern in letzterem Fall die Zeitantwort an einer Position auf einen einzelnen Wert kondensiert wurde. In der Praxis wird dazu häufig eine Integration über eine Region-of-Interest verwendet. Der Algorithmus wird im Folgenden für die Daten eines Detektors mit Doppel-D-Geometrie beschrieben. Das Vorgehen kann jedoch leicht für Detektoren mit einem anderen Spulendesign angepasst werden. Der Algorithmus lässt sich mathematisch wie folgt formulieren:

$$\text{symm}(S) = \text{onepass}(\text{grad}_x(\log(\text{onepass}(S)))) \quad (1)$$

$$\text{with } \text{onepass}_{i,j}(S) = \sum_{\substack{k \in \{-n, -n+1, \dots, n\} \\ l \in \{1, 2, \dots, n\}}} (S_{i+k, j+l} + S_{i-k, j-l} - 2S_{i,j})^2 \quad (2)$$

Der aufgezeichnete Datensatz ist dabei in einem 2D-Array mit Einträgen  $S_{i,j}$  hinterlegt. Der Parameter  $n$  beschreibt die Fenstergröße für die Symmetrie-Berechnungen. Um

optimale Ergebnisse zu erzielen, wird dieser Parameter an die Spulengröße angepasst. Der Gradient wird senkrecht zur Symmetrieachse des Detektors ausgeführt, wie dies in Abbildung 6 dargestellt ist. Eine räumliche Glättung der Daten verbessert typischerweise die Ergebnisse der Berechnungen. Daher wird vor der Durchführung der Berechnungen meist ein Mittelwert-Filter oder ein 2D-Butterworth-Tiefpassfilter angewendet. Die Qualität der Ergebnisse kann weiter verbessert werden, in dem vorab Methoden zur Bodenkompensation zum Einsatz kommen, wie sie im vorherigen Abschnitt beschrieben wurden.

**Ergebnisse für simulierte 2D-Datensätze:** Der neue Algorithmus wird zunächst anhand von simulierten Datensätzen evaluiert. Auf diese Weise kann die Leistungsfähigkeit unabhängig von weiteren Effekten beurteilt werden, wie sie bei realen Messdaten unter Umständen zusätzlich auftreten können (z.B. Variationen in der Bodenzusammensetzung). Die Simulationsdaten wurden mit dem Programm »minex2df« berechnet, das im Rahmen des Projektverbunds von den Partnern aus Köln entwickelt wurde. Die Konfiguration für die Simulation besteht aus zwei Stahlkugeln mit einem Durchmesser von 10 mm. Diese liegen in der X-Y-Ebene an den Positionen (30 cm, 30 cm) und (90 cm, 30 cm), in einer Tiefe von 5 cm bzw. 10 cm unter der Detektorebene. Die Anregungsfrequenz ist 2.400 Hz. Die Induktionswerte sind für ein reguläres räumliches Gitter mit einer Gitterweite von 2 mm berechnet und mit einem festen Faktor skaliert. Der auf diese Weise generierte Ausgangsdatsatz ist in Abbildung 6 dargestellt.

Zunächst wurden zwei etablierte Algorithmen aus dem Bereich der Bildverarbeitung auf die simulierten Datensätze angewendet. In beiden Fällen wurden die simulierten Datensätze so vorbehandelt, dass sie die Symmetrievoraussetzungen der Algorithmen erfüllen (Rotationssymmetrie, umgesetzt über eine Integration entlang der X-Achse). Weiterhin wurden die Induktionsdaten linear auf das Intervall [0:255] transformiert, da die Algorithmen aus der Bildverarbeitung typischerweise auf dieses Intervall optimiert sind.

Der Algorithmus von Reisfeld lokalisiert gut das Objekt mit hohem Kontrast, nicht jedoch das Objekt mit niedrigem Kontrast auf der rechten Seite (Abbildung 7). Selbst wenn die Daten vorab mit Methoden zur Kontrastverstärkung behandelt wurden, wie beispielsweise eine logarithmische Skalierung der Daten, bleibt dieser Mangel bestehen. Grundsätzlich ist für das Objekt mit geringer Tiefe eine noch ausreichende Lokalisierung gegeben, wenn diese offensichtlich auch noch deutlich verbesserbar ist. Der Algorithmus von Kovesi detektiert Objekte mit unterschiedlichen Kontrasten, wie dies in Abbildung 8 erkennbar ist. In diesem Fall ist jedoch die Lokalisierung, sprich das zuverlässige Pin-Pointing der Metallobjekte, nicht zufrieden stellend: Es gibt keinen scharfen Peak als Markierung des Symmetrie-Zentrums. Aufgrund der beschriebenen Restriktionen eignet sich keiner der beiden Algorithmen für ein automatisches Pin-Pointing von Metallobjekten.

Abbildung 6: Simulierte Messdaten für einen CW-Detektor mit einer Empfangsspule in Doppel-D-Geometrie. Die Szene enthält zwei Stahlkugeln in einer Tiefe von 5 cm (links) & 10 cm (rechts). Dargestellt sind Induktionswerte.

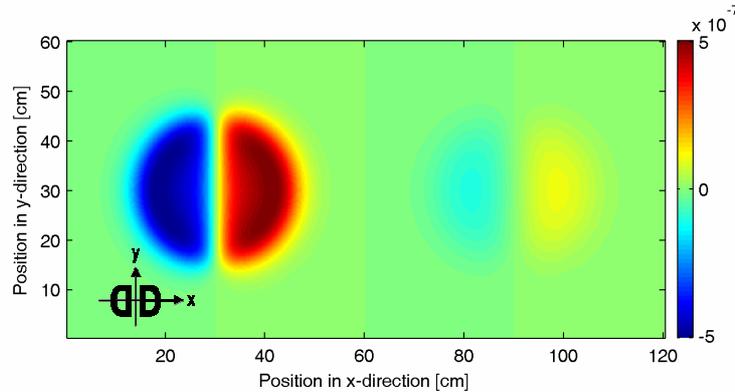


Abbildung 7: Ergebnisse des Symmetrie-Operator  $S_1(p,1)$  von Reisfeld et al. Nur das linke Objekt mit hohem Kontrast wird zuverlässig angezeigt.

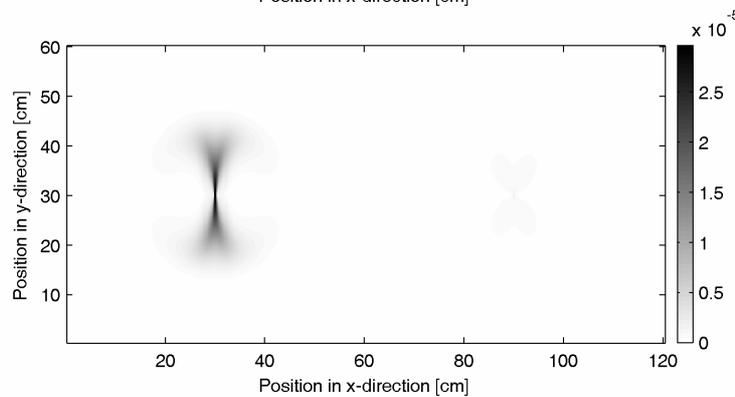


Abbildung 8: Ergebnisse des Symmetrie-Operators von Kovesi. Beide Objekte werden angezeigt. Allerdings sind die Objektzentren nur sehr unscharf angezeigt.

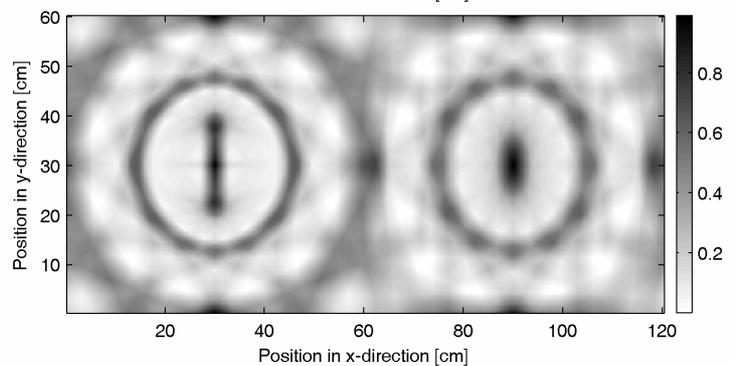
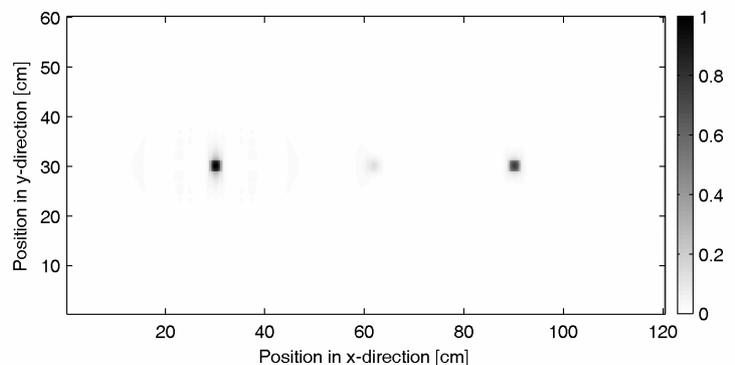


Abbildung 9: Ergebnisse zum neuen Algorithmus (1) für das automatische Pin-Pointing, mit  $n=20$  cm. Beide Objekte werden gefunden. Das Ergebnis des Pin-Pointing ist gut zu lokalisieren und zudem genau.



In Abbildung 9 ist das Ergebnis des Algorithmus für das automatische Pin-Pointing dargestellt, der vom Fraunhofer IPA im Rahmen des Projektverbunds entwickelt wurde (vgl. Gleichung (1)). Die beiden Metallkugeln werden räumlich sehr gut lokalisiert, d.h. die beiden dunklen Flächen liegen an den korrekten X-Y-Positionen und weisen einen nur geringen Flächeninhalt auf. Der Einfluss des Kontrasts auf die Intensität der Flächen wie auch auf die Größe der Flächen ist gering. Die guten Ergebnisse sind dabei auf die spezielle Konstruktion des Algorithmus zurückzuführen: Die präzise Lokalisierung wird durch die zweifache Anwendung der Symmetrie-Berechnung in Formel (2) bedingt. Die Unabhängigkeit vom Kontrast im Datensatz ist auf die dazwischen angewandete Operation  $grad(log)$  zurückzuführen.

Mit dem neuen Symmetrie-Algorithmus lässt sich eine deutliche Verbesserung für das automatische Pin-Pointing erzielen. Eine weitere Verbesserung der Genauigkeit kann durch die Anwendung eines Center-of-Mass-Algorithmus erzielt werden, um die genaue Lage des Objektzentrums mit Sub-Pixel-Genauigkeit zu bestimmen.

**Ergebnisse für einen realen Datensatz:** Nach den positiven Ergebnissen an simulierten Datensätzen wurde der Algorithmus für das automatische Pin-Pointing an realen Datensätzen evaluiert. Ein solcher Datensatz stellt erhöhte Anforderungen an den Algorithmus, da nun auch Sensordrift, Sensorrauschen und Fluktuationen im Bodensignal auftreten können.

Die Messdaten wurden vom Projektpartner Fraunhofer IZFP in Ispra aufgezeichnet. Zum Einsatz kam dabei ein CW-Metalldetektor mit einer Anregungsfrequenz von 2,4 kHz. Der Datensatz wurde noch vor der internen Auswertung des Metalldetektors aufgezeichnet, kurz nach dem Verbindungselement zur Empfängerspule. Der Metalldetektor wurde für die Aufnahmen auf einen X-Y-Scanner montiert, der in einem Zig-Zag-Muster über das Testfeld bewegt wurde.

In Abbildung 10 ist der Datensatz zum Boden »4A« gezeigt. Wie erwartet weisen Metallobjekte die typische Symmetrie auf (die vergrabenen Objekte befinden sich in der Nähe der Kreuzungspunkte des zusätzlichen Gitters). Die Ergebnisse der Pin-Pointing-Algorithmus sind als nummerierte schwarze Punkte eingezeichnet.

Wie erwartet detektiert der Algorithmus schwache Signale, die sonst nur schwierig zu detektieren wären (Objekt Nr. 7; Minensurrogat M1A in 5 cm Tiefe). In größeren Tiefen ist das Minensurrogat M1A jedoch nicht mehr zu detektieren, weder mit Symmetrie- noch mit Schwellwertmethoden. Beim Objekt mit der Nummer 4 handelt es sich um ein Schrapnell-Objekt, das mit dem klassischen Schwellwertansatz nicht gefunden worden wäre.

Ausgedehnte Metallobjekte mit komplexer Gestalt sind mit dem Symmetrie-Algorithmus unter Umständen nicht detektierbar, wenn dadurch den dazugehörigen Messdaten die typische Symmetrie fehlt. Ein Beispiel dafür sind die Objekte mit den Nummern 11 & 15, die in Wirklichkeit zu einem einzigen Objekt gehören. In derartigen Fällen sind die Messsignale aber in der Regel so stark, dass sie auch leicht mit dem Schwellwertverfahren gefunden werden. – Der Algorithmus erzeugt unter gewissen Umständen auch Falschalarme, wie zum Beispiel das Objekt Nr. 5. In diesem Fall detektiert der Algorithmus fälschlicherweise ein Objekt zwischen zwei anderen, dominierenden Signalen. Derartige Artefakte lassen sich jedoch in einer erweiterten Version des Algorithmus abfangen.

Das Ergebnis dieser Evaluation ist, dass der Algorithmus sehr gut mit Einflüssen zu Recht kommt, wie sie in realen Datensätzen auftreten können.

Der Algorithmus stellt eine geeignete Erweiterung zu Schwellwert-basierte Methode dar.

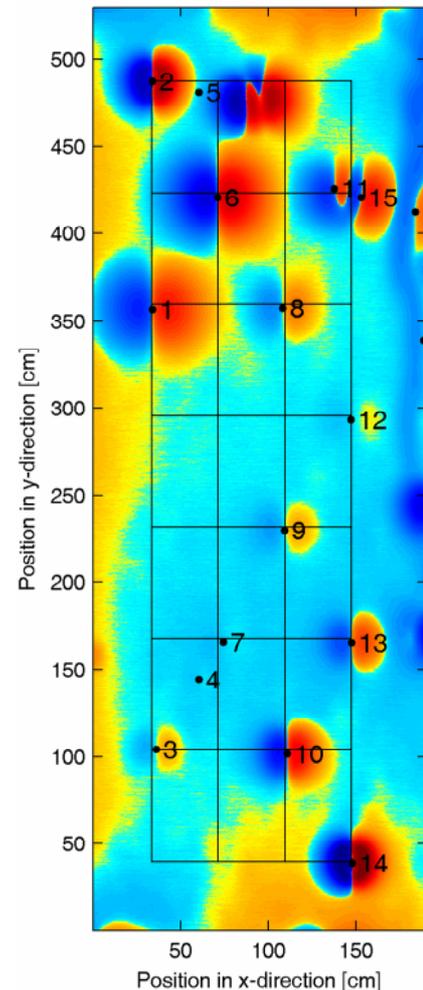


Abbildung 10: Der Realteil der Messsignale für den Boden »4A«, nach Konversion auf eine logarithmische Skala zur Verstärkung von Signaldetails. Das Gitter dient als Orientierungshilfe. Die Ergebnisse des automatischen Pin-Pointing-Algorithmus sind mit nummerierten Punkten markiert.

### 6.1.3 Charakteristische 2D-Phasenwerte

Werden Metalldetektoren in einem Minenfeld eingesetzt, so suchen Minensucher mittels Pin-Pointing-Methoden gezielt nach solchen Bereichen, in denen möglicherweise eine Mine vergraben ist. Das Pin-Pointing kann dabei manuell oder mittels eines automatisch arbeitenden Algorithmus erfolgen, wie dies im vorherigen Abschnitt beschrieben wurde. Der Datensatz in der Umgebung eines fraglichen Objekts wird in dem dazugehörigen Bodenabschnitt einer genaueren Untersuchung unterzogen. Dem Minensucher werden über die Berechnung von charakteristischen 2D-Phasenwerten zusätzliche Informationen zur Verfügung gestellt.

**Grundprinzip des Algorithmus:** Als Ausgangspunkt für die Entwicklung des Algorithmus dienten simulierte 2D-Datensätze zu verborgenen Objekten, die mit Methoden der Signalanalyse untersucht wurden. Wie im vorherigen Abschnitt war dazu erneut das Simulationsprogramm der Projektpartner aus Köln im Einsatz, das als Ergebnis die induzierten Spannungen in der Empfängerspule liefert (mit Real- und Imaginärteil). In den Simulationen können grundlegende Effekte ohne zusätzliche Störungen untersucht werden.

Ein wesentliches Ergebnis der Analyse der Simulationsdaten ist, dass der Quotient für verschiedene Kombinationen von Messkanälen (Real- oder Imaginärteile für verschiedene Frequenzen) sich nicht ändert, wenn der Detektor über eine Kugel geschwenkt wird (wie dies bereits in Abschnitt 6.1.1 erläutert wurde). Der Quotient ist wie beschrieben unabhängig vom Offset zwischen dem Detektor und dem Metallobjekt; des Weiteren ist der Quotient auch unabhängig von der Tiefe des Objekts. Andererseits besteht sehr wohl eine Abhängigkeit des Quotienten vom Radius der Kugel, von deren elektrischer Leitfähigkeit wie auch deren magnetischer Permeabilität. Aus diesem Grund kann der Quotient dazu verwendet werden verschiedene simulierte Objekte voneinander zu unterscheiden. Derselbe Zusammenhang gilt auch für die Phase eines (komplexwertigen) Signalwerts, da die Phase nach Definition eine inverse trigonometrische Funktion des Quotienten ist.

Die Annahme eines konstanten Phasenwertes trifft in der Praxis näherungsweise nur für kleine metallische Objekt und metallische Kugeln zu. Insbesondere bei großen und komplexen Objekten können sich Phasenwerte deutlich ändern, wenn der Detektor über das Objekt geschwenkt wird. Daher gilt es zu berücksichtigen, dass in der Praxis typischerweise nicht bekannt ist, ob ein vergrabenes Objekt die Form einer Kugel aufweist (oder nicht).

Basierend auf diesen Ergebnissen beruht der neue Algorithmus zur Diskriminierung von verschiedenen Objekten auf folgendem Prinzip: Wenn sich Phasenwerte (oder ähnliche Kombinationen der Messwerte) in der Nähe eines vergrabenen Objekts nur

schwach ändern, dann und nur dann werden gemittelte multidimensionale Phasenwerte als ein zusätzliches Merkmal zur Diskriminierung von Objekten herangezogen.

**Beschreibung des Algorithmus:** Die Eingangsgröße für den Algorithmus zur Berechnung der charakteristischen 2D-Phasenwerte sind Datensätze, die mit einem CW-Metalldetektor mit zwei Anregungsfrequenzen aufgezeichnet wurden. Für die nachfolgende Beschreibung wird das Spulendesign als Doppel-D-Geometrie vorausgesetzt; der Algorithmus kann aber leicht an andere Geometrien angepasst werden. Der Detektor wird zum Zwecke der Datenaufnahme über das zwar verborgene, aber zumindest schon lokalisierte Metallobjekt geschwenkt.

Während der Bewegung werden kontinuierlich Messdaten  $d_i = (re1_i, re2_i, im1_i, im2_i)$  aufgezeichnet, die entsprechend dem Vorgehen in Abschnitt 6.1.1 in sphärische Koordinaten  $\hat{d}_i = (r_i, \theta_i, \vartheta_i)$  umgerechnet werden. Um eindeutige Phasenwerte zu erhalten (im Kontext von komplexen Signalen) werden die zulässigen Werte für  $\theta_i$  und  $\vartheta_i$  auf einen Halbraum beschränkt.

Nachfolgend werden die Schwankungen in den Phasenwerten ausgewertet. Wenn diese unterhalb eines vorgegebenen Schwellwerts bleiben, so werden die charakteristischen 2D-Phasenwerte  $\theta_{ch}$  und  $\vartheta_{ch}$  berechnet. Um dabei Rauscheffekte zu minimieren, werden nur Phasenwerte mit einem hohen Signalwert  $r_i$  berücksichtigt. Bei räumlich aufgelösten Messdaten können speziell auch nur solche Daten herangezogen werden, die sich in der Nähe von den erwarteten Signalextrema befinden.

$$\begin{pmatrix} \theta_{ch} \\ \vartheta_{ch} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{mean}(\{\theta_i \mid r_i > r_{\min}\}) \\ \text{mean}(\{\vartheta_i \mid r_i > r_{\min}\}) \end{pmatrix} \quad (3)$$

Die Erweiterung des Algorithmus auf Datensätze von CW-Metalldetektoren mit mehreren Anregungsfrequenzen ist auf nahe liegende Weise umsetzbar.

**Ergebnisse für simulierte 2D-Datensätze;** Die Leistungsfähigkeit des Algorithmus wird zunächst anhand von simulierten Datensätzen evaluiert, ähnlich dem Vorgehen aus dem vorherigen Abschnitt. Bei den simulierten Objekten handelt es sich um verschiedene Stahlkugeln mit Durchmessern zwischen 4 mm und 36 mm. Diese sind in verschiedenen Tiefen von 20 mm bis 200 mm positioniert. Die Anregungsfrequenzen sind 2,4 kHz und 19,2 kHz. Die Werte für die Induktionsspannungen werden für eine geradlinige Bewegung des Detektors berechnet, die direkt über das Zentrum der gepointeten Position führt.

Charakteristische 2D-Phasenwerte sind ein effizientes Merkmal zur Unterscheidung verschiedener Kugeln (siehe Abbildung 11). Die Ergebnisse für dieselbe Kugel in verschiedenen Tiefen liegen bei den simulierten Daten direkt übereinander, d.h. das Merkmal ist in der Tat unabhängig von der Tiefe. Darüber hinaus, und von besonderer

Bedeutung für das Humanitäre Minensuchen, eignet sich das Merkmal besonders gut für die Identifikation kleiner Metallobjekte; der relative Abstand zwischen Kugeln mit leicht unterschiedlicher Größe ist in diesem Fall besonders ausgeprägt.

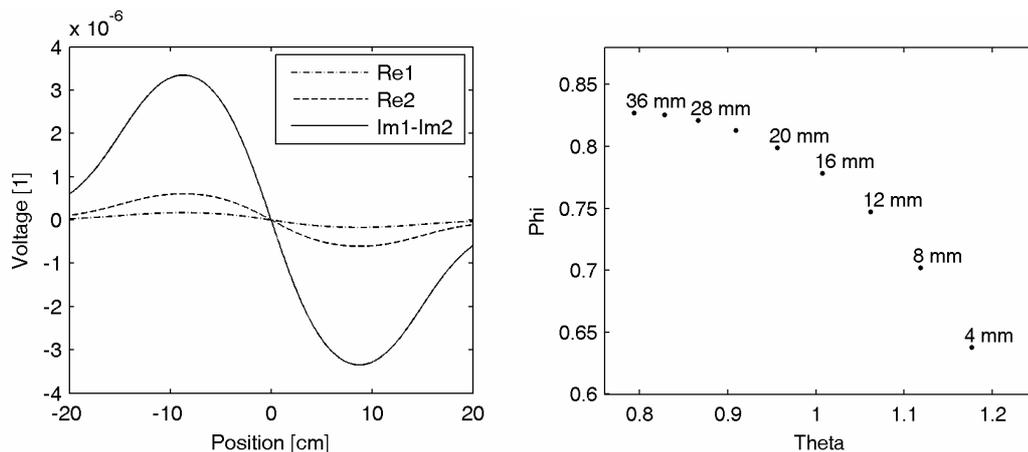


Abbildung 11: **Links:** Simulierte Induktionsmesswerte für eine Kugel. Der Quotient zu verschiedenen Antwortkanälen ist unabhängig von der Position (also der x-Achse in diesem Fall). **Rechts:** Charakteristische 2D-Phasenwerte für simulierte Stahlkugeln mit unterschiedlichen Radien. Die Materialparameter sind  $\mu_r = 400$  und  $\sigma = 5.46$  MS/m.

**Ergebnisse für reale Messdaten:** Der Algorithmus für charakteristische 2D-Phasenwerte wurde im Weiteren an realen Messdaten evaluiert. In diesem Fall wurde der Datensatz auf dem verbundeigenen Versuchsfeld in Rostock aufgezeichnet. Auf dieser Testfläche wurden Stahlkugeln mit unterschiedlichem Durchmesser wie auch Minensurrogate (M1A und M2B) in einem Lößboden vergraben. Die Objekte wurden in Tiefen zwischen 20 mm und 200 mm eingebracht. Die Messungen wurden mit einem CW-Metalldetektoren in Doppel-D-Konfiguration durchgeführt. Die Anregungsfrequenzen waren 2,4 kHz und 19,2 kHz. Der Metalldetektor wurde auf einem X-Y-Scanner montiert, der in einem Zig-Zag-Muster über das Testfeld bewegt wurde.

In einem ersten Schritt wurde der Algorithmus zum automatischen Pin-Pointing auf die Datensätze angewendet, um so die Objektzentren der Metallobjekte zu lokalisieren. Objekte mit einem hohen Metallgehalt werden auf diese Weise in allen Vergrabungstiefen gefunden. Objekte mit einem geringen Metallgehalt, wie beispielsweise das Minensurrogat M1B, werden hingegen nur bis hin zu einer maximalen Detektionstiefe gefunden, die objektabhängig ist und typischerweise weniger als 200 mm beträgt.

Alle lokalisierten Metallobjekte wurden mit dem beschriebenen Algorithmus analysiert, der die charakteristischen 2D-Phasenwerte liefert. Obwohl die Phasenwerte der Objekte nun zusätzlich mit Störsignalen (Bodenvariationen und Sensorrauschen) beauf-

schlagt sind, sind die Phasenwerte der Kugeln weiterhin fast komplett unabhängig vom (senkrechten) Abstand zwischen dem Detektor und dem vergrabenen Objekt (siehe Abbildung 12).

Die durchgeführten Evaluationen zeigen, dass sich charakteristische 2D-Phasenwerte prinzipiell dazu eignen, um unbekannte Objekte unter gewissen Umständen klassifizieren zu können. Dies lässt sich gut anhand der Abbildung 12 illustrieren: Die Phasenwerte zu einem Typ von Objekt (in verschiedenen Vergrabungstiefen) liegen eng beieinander, was durch die grauen Boxen hervorgehoben wird. Da die Boxen in der Abbildung nicht überlappen eignen sich die Phasenwerte für die Unterscheidung dieser Objekte. Ein Klassifikator kann nach einer Einlernphase die beiden Kategorien „Objekt ist möglicherweise eine Mine“ oder „Objekt ist sicher keine Mine“ unterscheiden, sofern dem System alle gefährlichen Minenobjekte eingelernt wurden. Weiterhin ist es erforderlich, dass Metallobjekte nicht zu nahe beieinander liegen, da dies die Berechnung von Phasenwerten verfälschen kann: Unter ungünstigen Voraussetzungen könnte eine Mine und ein ungefährlicher Metallsplitter gemeinsam eine Signalantwort erzeugen, dessen Phase unverdächtig ist. Da die verschiedenen Cluster in der Abbildung weit auseinander liegen, können einfache Standardklassifikatoren zum Einsatz kommen wie beispielsweise NN-Klassifikatoren.

Die beobachteten 2D-Phasenwerte stimmen gut mit den Werten überein, die in den Simulationen vorhergesagt wurden. Zudem ist auch der Abstand zwischen zwei kleinen Kugeln deutlich größer als der Abstand zwischen zwei großen Kugeln. Die größeren und komplexeren Objekte M1A und M2B liegen abseits der Linie, die durch die Kugeln mit verschiedenen Radii definiert wird.

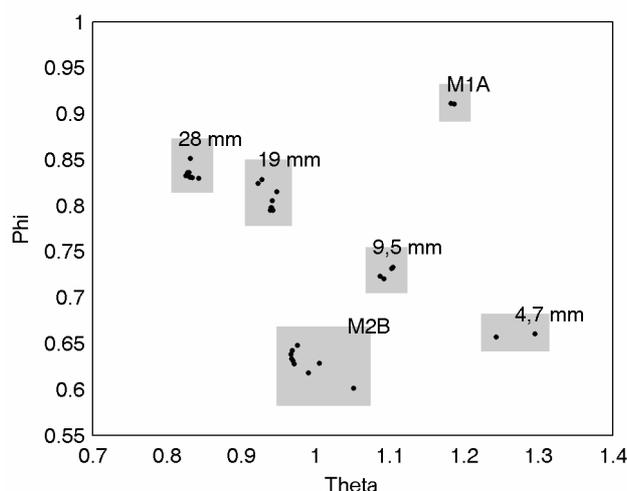


Abbildung 12: Charakteristische 2D-Phasenwerte für verschiedene Objekte. Alle Werte für einen einzelnen Objekttyp liegen innerhalb der markierten grauen Boxen. Jeder Punkt innerhalb einer Box gehört zu einer unterschiedlichen Objektiefe (nicht benannt).

### 6.1.4 Tiefenbestimmung

Bei Messungen mit einem Metalldetektor, bei dem die Empfängerspule in einer Doppel-D-Geometrie ausgelegt ist, beobachtet man in den Signaturen ein dominierendes Muster (siehe Abbildung 13): Das Zentrum des Objekts ist mit einem schwarzen Punkt markiert. Links davon befindet sich ein Bereich mit niedrigeren Spannungen (blau), rechts davon ein Bereich mit größeren Spannungen (rot). Die dargestellte Geometrie der Bereiche mit negativer und positiver Spannung ist typisch für ein (kleines) Metallobjekt. In derselben Abbildung ist rechts der Spannungsverlauf bei einem Schwenk über das lokalisierte Zentrum gezeigt. Wie man sieht, lassen sich diese Daten sehr gut durch eine abgeleitete Gaußfunktion modellieren:

$$f(x) = a \cdot (b \cdot x) \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2} (b \cdot x)^2\right\} + c$$

Die bei einer Regression ermittelten Parameter  $a$  und  $b$  sind Größen, die für eine weitere Analyse der verborgenen Objekte herangezogen werden können. Die Parameter sind auch aus Sicht der Minenräumpraxis interessant, da sie sich prinzipiell auch aus der Lage und der Höhe der Signalextrima bestimmen lassen.

Der Parameter  $a$  hat einen engen Bezug zu den bereits im letzten Abschnitt diskutierten Phasenwerten, weshalb im Weiteren speziell die Merkmale des Parameters  $b$  diskutiert werden.

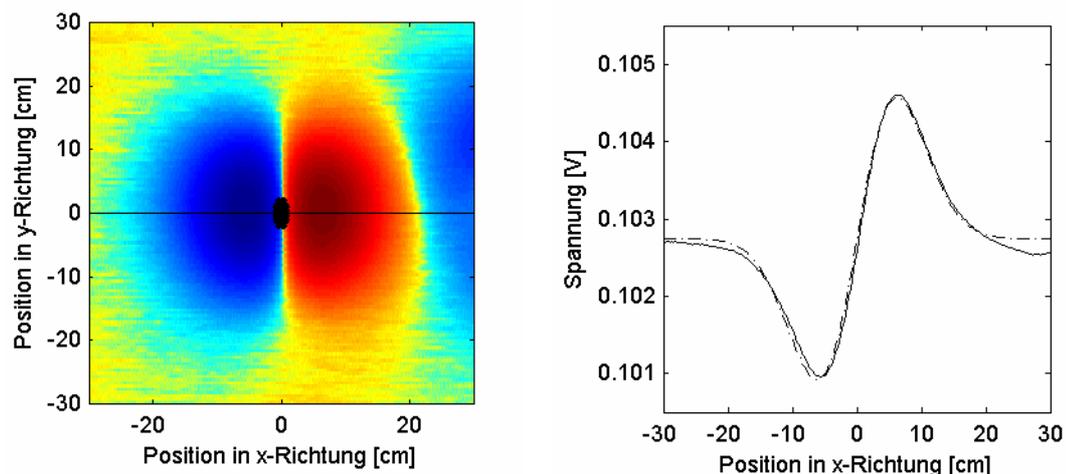


Abbildung 13: **Links:** Messdaten zu einem verborgenen Minensurrogat, Scanrichtung entlang der x-Achse (Farbskala: niedrige Spannungen – blau, hohe Spannungen – rot). **Rechts:** Messdaten entlang eines Schwenks über das Objektzentrum (durchgezogene Linie); angefittete Funktion  $f$  (gestrichelte Linie)

**Ergebnisse für simulierte 2D-Datensätze:** Für die Erstellung der Simulationsdaten kam erneut das Programm »minex2df« der Universität Köln zum Einsatz, das bereits in den vorherigen Abschnitten genauer besprochen wurde. Im Rahmen der Simulationen wurden verschiedene Parameter variiert, wie beispielsweise Tiefe, Größe und Material der Kugeln. Im Folgenden wird dargestellt, welchen Einfluss die Simulationsparameter auf den Wert des Anpassungsparameter  $b$  aufweisen.

In Abbildung 14 ist der Parameter  $b$  als Funktion der Kugeltiefe und des Kugelradius aufgetragen, bei festem Materialparameter und fester Anregungsfrequenz. Man erkennt sehr gut, dass der Kugelradius keinen Einfluss auf die Breite des dominierenden Musters hat. In Abbildung 15 sind Differenzbilder bei Variation des Materials und der Anregungsfrequenz gezeigt. Anhand der Skala sieht man, dass diese beiden Parameter nur einen sehr geringen Einfluss auf den Parameter  $b$  haben.

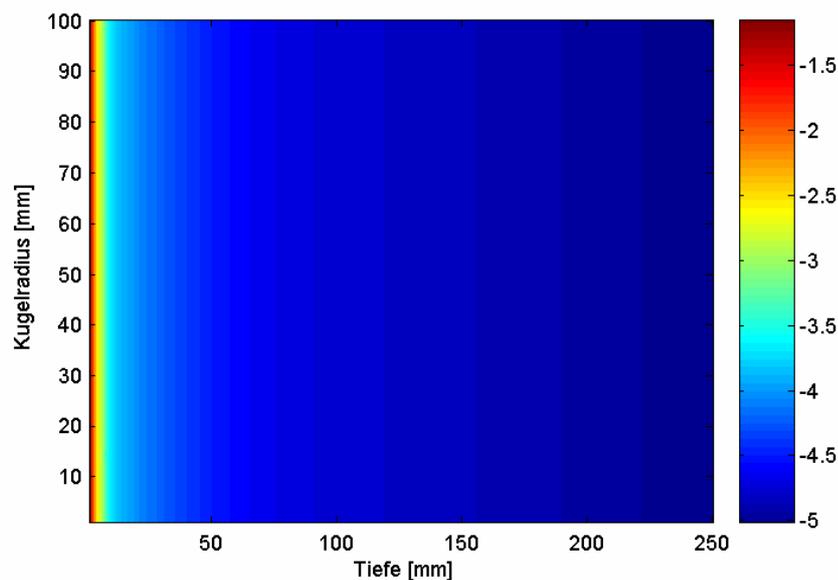


Abbildung 14: Darstellung von  $\log(b)$  über den Parametern Kugeltiefe und Kugelradius. Die Anregungsfrequenz ist  $f=2,4$  KHz, die Leitfähigkeit  $1e7$  S/m.

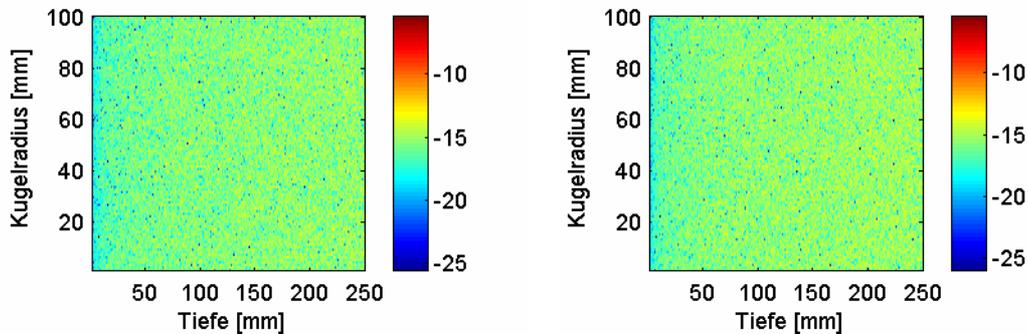


Abbildung 15: **Links:** Differenzbild für  $\log(b)$  für zwei unterschiedliche Frequenzen  $f_1=2,4$  KHz und  $f_2=19,2$  KHz. **Rechts:** Differenzbild für  $\log(b)$  für zwei unterschiedliche Leitfähigkeiten  $s_1=1,0e7$  S/m und  $s_2=6,8e7$  S/m.

Die anhand der synthetischen Daten gewonnen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen: Aus den Simulationen, die ja vom Prinzip her Vorwärtsrechnungen sind, und der anschließenden Parameterschätzung ergibt sich eine Abbildung  $g$  der funktionellen Art

$$b \cong g(\text{Tiefe}) .$$

**Anwendung auf reale Messdaten aus Ispra:** Die Praxistauglichkeit der dominanten, lokalen Struktur wird im Folgenden anhand von realen Datensätze aus Ispra evaluiert. In den Testflächen dieses Versuchsfelds sind Minensurrogate vom Typ M1A und M1B vergraben. Zu den Böden liegen Datensätze vor, in denen zunächst die Zentren der Metallobjekte lokalisiert werden. In Abbildung 16 sind die hier weiter untersuchten Ausschnitte aus den Böden 4A (Sand) und 5A (Tonerde) dargestellt. An die einzelnen Signaturen wird im Anschluss die dominierende Struktur angefügt, wie dies zu Beginn des Abschnitts erläutert wurde.

Bei der Auswertung des Parameters  $b$  lässt sich beim Boden 4A gut auf die Tiefe zurückschließen, zumindest bei dem vorliegenden Datenmaterial (vgl. Abbildung 17): Die Messwerte für das Objekt M1A lassen sich (in der gewählten Darstellung) gut durch eine linearen Zusammenhang beschreiben. Ein Vergleich der Daten zu den Objekten M1A und M1B zeigt jedoch auch, dass der Parameter  $b$  nicht ausschließlich von der Tiefe des Objekts abhängt.

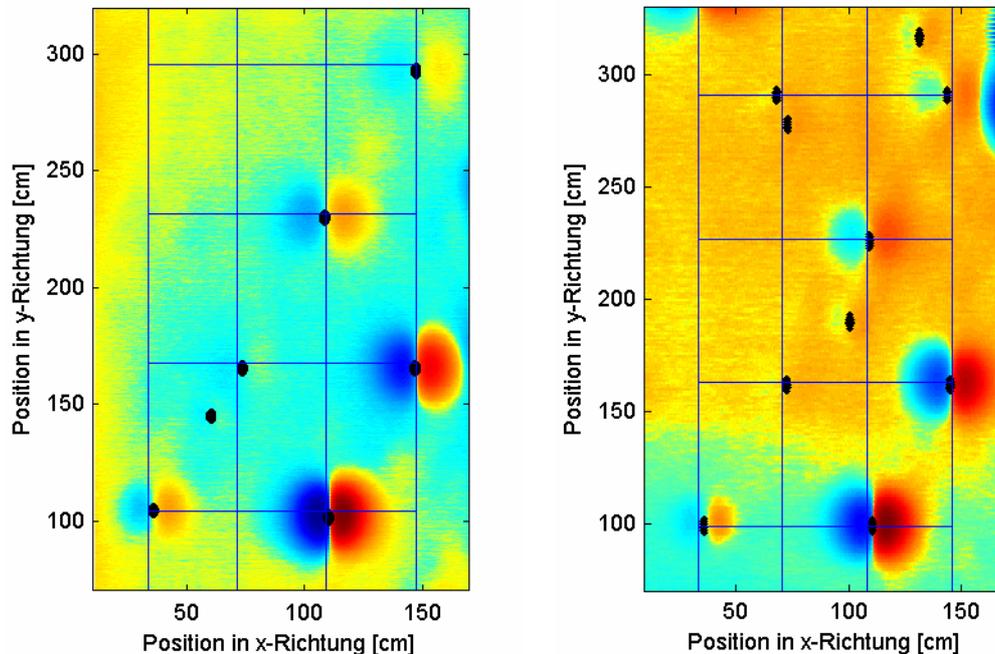


Abbildung 16: **Links:** Ausschnitt aus dem Boden 4A. **Rechts:** Ausschnitt aus dem Boden 5A. – In beiden Böden sind links vier Minen des Typs M1A (nicht alle detektierbar) und rechts vier Minen des Typs M1B vergraben. Die Zentren der Minen liegen in etwa auf den Gitterpunkten. Man erkennt abseits der Gitterpunkte weitere unbekannte Metallobjekte.

Die Darstellung des Parameters  $b$  für den Boden 5A zeigt bei den Tiefen von 15 cm Abweichungen vom prognostizierten Verlauf. Nach den durchgeführten Analysen ist dies höchstwahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass es aufgrund der niedrigen Signalstärke in dieser Tiefe und aufgrund des groben Messrasters beim Boden 5A zu deutlicheren Messfehlern kommt.

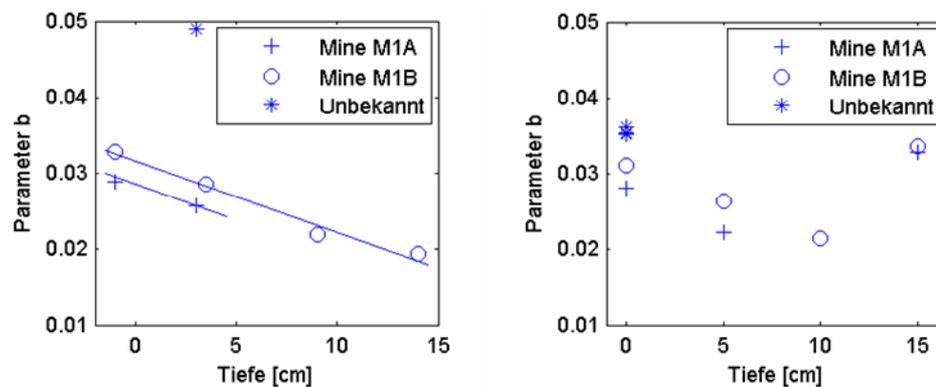


Abbildung 17: Werte des Parameters  $b$  für verschiedene Objekte im Boden. **Links:** Boden 4A. **Rechts:** Boden 5A.

### 6.1.5 Sequentielle Ausführung der Algorithmen

Das Fraunhofer IPA hat im Rahmen des Projekts eine Signalverarbeitungskette entwickelt, die in Abbildung 3 als vereinfachtes Flussdiagramm vorgestellt wurde. Nachdem die algorithmischen Bestandteile der Kette in den vorherigen Abschnitten vorgestellt wurden, kann damit nun eine vollständige Analyse von Messdaten vorgenommen werden.

Die Signalanalysekette wird im Folgenden für einen Abschnitt des Bodens »4A« aus Ispra evaluiert (Abbildung 18), anhand dessen die verschiedenen positiven Effekte der Algorithmen aufgezeigt werden können. In dem Abschnitt sind laut Lageplan des JRC eine Referenzkugel, zwei Minensurrogate M1B und ein Minensurrogat M1A vergraben. Diese Objekte werden mit einem konventionell bedienten Metalldetektor auch anhand des Schwellwert-Verfahrens gefunden und akustisch angezeigt (linke Spalte mit Referenzsignal).

Der erste Schritt in der Signalanalysekette beinhaltet die Reduktion des Bodeneinflusses. In dem Ergebnisbild (farblich kodiertes Bild in der Mitte) fällt bereits mit dem bloßen Auge ein weiteres Objekt auf, das zunächst nicht detektiert wurde.

Im Anschluss werden alle Objekte durch das automatische Pin-Pointing sicher lokalisiert, und gelten damit als zu untersuchende Metallobjekte, zu denen zunächst keine weiteren Informationen bekannt sind.

Über die Auswertung der charakteristischen 2D-Phasenwerte wird für die einzelnen Objekte vermerkt, ob es sich dabei möglicherweise um eine Mine handeln könnte. In der Auslegung des Algorithmus entspricht dies der Überprüfung, ob die berechneten Phasenwerte in der Nähe von Phasenwerten liegen, die zu eingelernten Minentypen gehören; für diese Evaluation waren in dem Algorithmus Daten zu den beiden Minentypen M1A und M2B hinterlegt (vorab durchgeführte Messungen in Luft, wie dies auch durch einen Minensucher vor Ort durchgeführt werden kann). Die drei Minensurrogate werden korrekt als potentiell gefährliche Objekte eingestuft, die beiden anderen Objekte nicht.

Anhand der numerischen Zahlen für die Phasenwerte wird zudem angezeigt, welchem eingelernten Objekttyp das Signal ähnlich erscheint. Bei den drei Minensurrogaten wird richtigerweise die Ähnlichkeit der Phasenwerte zu M1A bzw. M1B angezeigt. Die beiden anderen Messsignale ähneln hingegen stark den Signaturen von kugelförmigen Objekten, was für das rechts unten liegende Objekt gemäß dem Lageplan eine korrekte Aussage ist (Referenzkugel). Für das zusätzliche, nicht im Lageplan vorhandene Objekt mit der Nr. 4 wird ebenfalls eine hohe Ähnlichkeit mit einer Kugel ermittelt. Es stellte sich bei einer Untersuchung auf der Testfläche heraus, dass es sich bei diesem

Objekt vermutlich um einen kleinen metallischen Einflug handelt. Da sich kleine Objekte prinzipiell gut als kleine Kugeln beschreiben lassen, ist also auch in diesem Fall eine richtige Objektzuordnung erfolgt.

Für die beiden Kugelobjekte ist nach der Objektklassifikation auch eine Tiefenbestimmung möglich. Die Tiefe der Referenzkugel wird mit »kleiner 2 cm« korrekt wiedergegeben; die Referenzkugel liegt leicht erhöht über der Bodenoberfläche (der Abstand dürfte bei der Messung etwa 2 cm betragen haben). Der Wert für das Objekt Nr. 4 von »kleiner < 2 cm« stützt die These eines metallischen Einflugs.

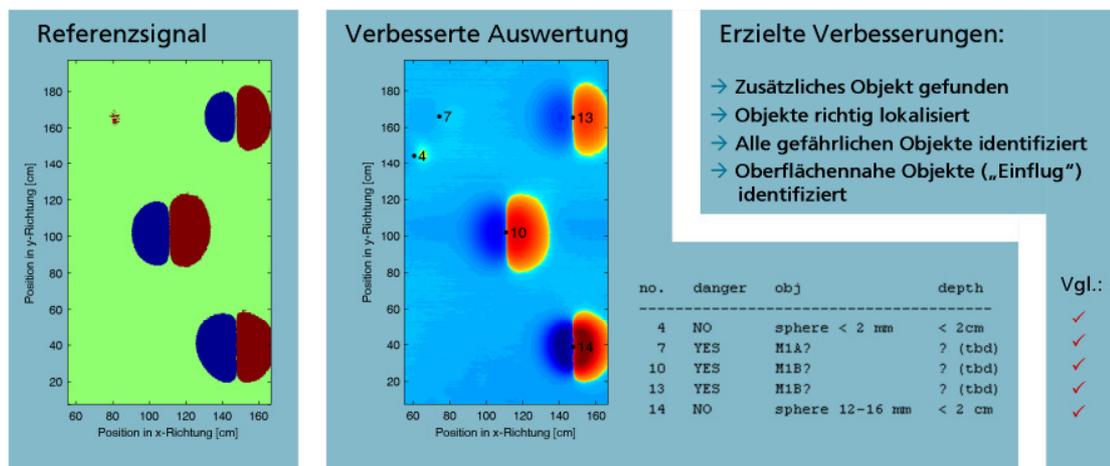


Abbildung 18: **Links:** Referenzsignal aus dem Detektor **Mitte:** Ergebnisse der detaillierten Berechnung. **Rechts:** Erzielte Verbesserungen.

### 6.1.6 Messkampagne Benkovac: Evaluation unter realitätsnahen Bedingungen

Nach der Fertigstellung der Algorithmen wurden diese zum Ende des Projekts (Oktober 2006) einer abschließenden realitätsnahen Evaluation unterzogen. Zu diesem Zweck wurden verschiedene neue Verfahren aus dem Projektverbund in Benkovac zum Einsatz gebracht, wo das kroatische »Mine Action Center« (kurz »CROMAC«) ein Ausbildungsgelände betreibt.

Von Seiten des Fraunhofer IPA war vor allem die Evaluation der charakteristischen 2D-Phasenwerte von Interesse. Insbesondere sollte der Frage nachgegangen werden, ob ein Einlernen der Minentypen direkt vor Ort stattfinden muss (in Luft oder ggf. sogar im Boden), oder ob auch hinterlegte Werte von einem anderen Standort eine zuverlässige Zuordnung von Minentypen ermöglichen. Da von dem Testgelände keinerlei Messdaten zu dem Boden bekannt waren, konnte vorab auch keine Prognose zu diesem Thema abgegeben werden.

Vor Ort in Benkovac wurde zunächst die konzeptionell anspruchsvollste Messung durchgeführt: Der Algorithmus durfte zur Klassifizierung nur auf diejenigen Werte zurückgreifen, die durch die Messungen auf dem verbundeigenen Versuchsfeld in Rostock eingelernt wurden (graue Kästen in Abbildung 12 und Abbildung 19). Mit diesem System wurden in Benkovac Phasenwerte zu verschiedenen Objekten berechnet, die dort vor Ort vergraben waren bzw. wurden. Dabei kamen insbesondere die Minensurrogate M1A und M2B zum Einsatz, wie auch eine Stahlkugel mit 19 mm Durchmesser. Wie in der Abbildung 19 links zu sehen ist, liegen die Messwerte zu den bereits bekannten Objekten in den vorab eingelernten Bereichen. Eine Klassifikation ist also in diesem Fall ohne weitere Anpassungen möglich. Verschiedene weitere mit »Cl« gekennzeichnete Clutter-Objekte liegen weit abseits der markierten Minenobjekte. Sofern es sich bei diesen Objekten um vereinzelt Metallobjekte handelt, kann es sich nicht um die Minensurrogate M1A und M2B handeln.

In den anderen konzeptionell einfacheren Messungen (Einlernen der Objekte vor Ort) konnten vergleichbar gute Ergebnisse erzielt werden.

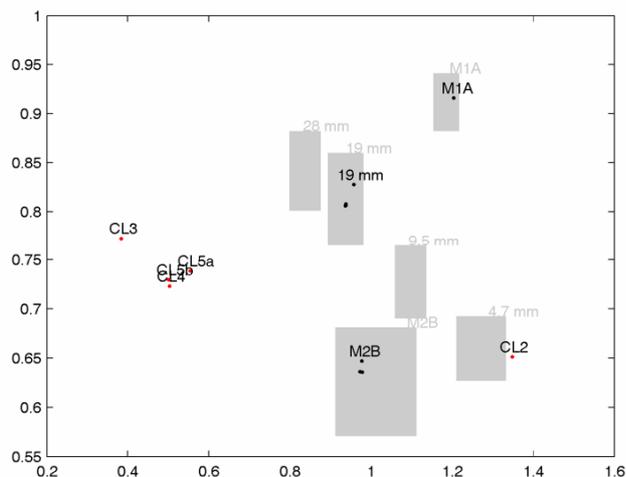


Abbildung 19: **Links:** Darstellung der berechneten Phasenwerte für Messungen in Benkovac, grau unterlegt sind die in Rostock eingelernten Zuordnungen. **Rechts:** Die Arbeit auf dem Testgelände.

## 6.2 Arbeitspaket M: Ortsaufgelöste Messdaten von tragbaren Metalldetektoren

Auf Basis von Beschleunigungssensoren lassen sich Messsysteme aufbauen, mit denen eine Positions- und Orientierungsbestimmung beispielsweise von tragbaren Systemen möglich ist. Ein wesentlicher Vorteil derartiger Systeme besteht darin, dass bei der Bestimmung der Raumkoordinaten nicht auf ein externes Referenzsystem Bezug genommen werden muss. Es sind somit keine Sender, Empfänger oder Markierungen erforderlich, die fest mit der Umgebung (beispielsweise dem Boden) verbunden sind. Als nachteilig erweist sich hingegen die notwendige zweifache Integration der Ortsdaten, da sich Fehler in den Messdaten schnell akkumulieren.

Die Grundidee ist wie folgt: Es werden mit einem herkömmlicher Metalldetektor und den zusätzlichen Sensoren Daten um das lokalisierte ("pin-pointed") Metallobjekt aufgezeichnet, um so einen erweiterten Datensatz  $\{(s_i, r_i, \mathbf{W}_i, p_i)\}$  mit  $i = 1 \dots N$  zu erzielen.

- $s_i$  Signal (Amplitude und Phase)
- $r_i$  räumliche Koordinaten
- $\mathbf{W}_i$  räumliche Lagebestimmung
- $p_i$  zusätzliche Parameter (z.B. Frequenzen)

Basierend auf den vorab bekannten Vor- und Nachteilen war es die Zielsetzung in diesem Arbeitspaket, die Leistungsfähigkeit von Beschleunigungssensoren für ein Szenario zu evaluieren, wie es in Abbildung 20 links dargestellt ist: Ein tragbarer Metalldetektor wird mit am Schaft mit Beschleunigungssensoren versehen.

Die technischen Anforderungen an das Messsystem wurden direkt zu Beginn des Arbeitspakets definiert. Sie orientieren sich am Einsatz der Metalldetektoren im Feld: Hat der Benutzer ein Metallobjekt im Boden geortet, so soll er um dieses Objekt herum ortsaufgelöste Metalldetektordaten aufzeichnen können. Dazu muss das Positionsgerät eine Genauigkeit von 0,5 cm über eine Zeitspanne von etwa 20-30 Sekunden einhalten können.

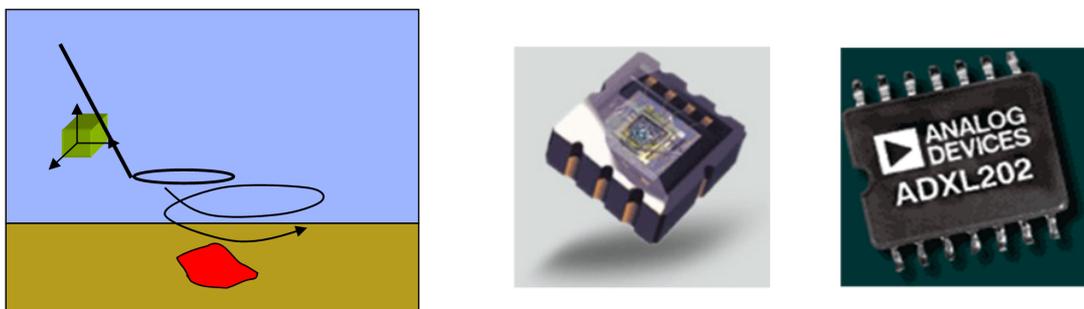


Abbildung 20: **Links:** Grundprinzip der Erweiterung eines Metalldetektors mit Beschleunigungssensoren. **Rechts:** Beispiele für kommerziell verfügbare MEMS-Beschleunigungssensoren (Quelle: MEMSIC und Analog Devices).

Kommerziell verfügbare Beschleunigungssensoren lassen sich in verschiedene Genauigkeitsklassen einordnen, die eng mit der Größe, dem Gewicht und dem Preis korrelieren. In Abbildung 21 ist eine Gegenüberstellung der verschiedenen Klassen dargestellt, wie sie im Rahmen dieses Arbeitspakets recherchiert wurden (siehe Anhang A für die Beschreibung der Parameter). Hohe Genauigkeiten bei den Gyroskopen lassen sich in der Praxis nur durch so genannte »ring laser gyroscopes« erzielen, wie sie beispielsweise in Flugzeugen zum Einsatz kommen. Aufgrund der Rahmenbedingungen für Größe, Gewicht und Preis eignen sich diese (und alle anderen Systeme aus den Bereichen »tactical-grade«, »navigation-grade« und »strategic-grade«) nicht für die Integration zu Metalldetektoren.

	Commercial-Grade	Tactical-grade	Navigation-grade	Strategic-grade	Geophysical limit
Gyro bias stability	1500°/hr/√hr	15°/hr/√hr	0.015°/hr/√hr	0.000015°/hr/√hr	0°/hr/√hr
Gyro bias initial uncertainty	150°/hr	1.5°/hr	0.0015°/hr	0.0000015°/hr	0°/hr
Accel bias stability	1 mg/√hr	100 µg/√hr	10 µg/√hr	0.5 µg/√hr	0 µg/√hr
Accel bias initial uncertainty	0.25 mg	10 µg	1 µg	0.1 µg	0.1 µg

Abbildung 21: Klassifizierung von Beschleunigungssensoren

Als mögliche Kandidaten verbleiben diejenigen Beschleunigungssensoren, die der Klasse »commercial-grade« (CG) zugeordnet werden. Zu dieser Klasse zählen beispielsweise auch Sensoren in MEMS-Bauweise, wie Sie exemplarisch in Abbildung 20 rechts abgebildet sind.

Die erzielbare Messungengenauigkeit kann anhand der typischen technischen Parameter abgeschätzt werden. Diese weist prinzipbedingt sowohl für die Positions- als auch für die Orientierungsbestimmung einen quadratischen Anstieg mit der Zeit auf (siehe Abbildung 22). Der Abbildung aus der Literatur kann man entnehmen, dass sich für die CG-Klasse eine typische Messungengenauigkeit im Ort von 3 cm innerhalb einer Messzeit von 3 s ergibt.

Am Fraunhofer IPA wurde auch ein eigenes Fehlermodell entwickelt, in dem typische Herstellerangaben berücksichtigt werden (wie beispielsweise »acceleration bias initial uncertainty«, »acceleration bias stability«, »initial orientation alignment«). Anhand dieses Modells konnten die groben Abschätzungen für die Messungengenauigkeit bestätigt werden. Es ist somit festzuhalten, dass sich die geforderte Genauigkeit nicht mit einer einfachen Kombination von Beschleunigungssensoren erreichen lässt.

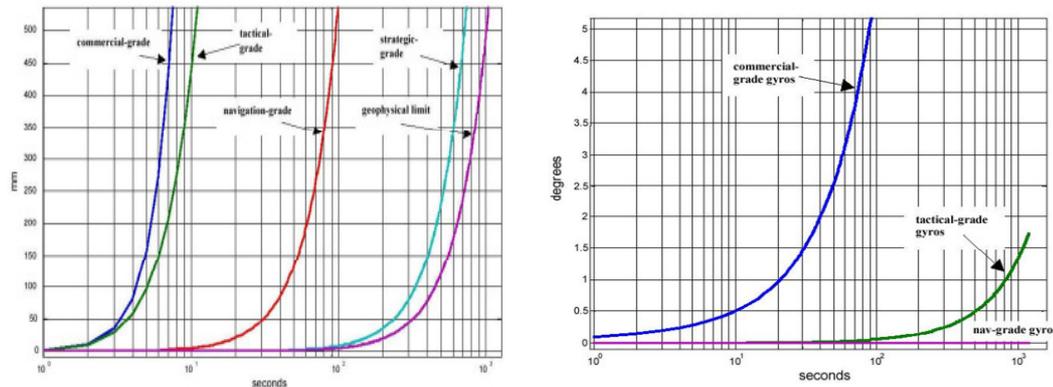


Abbildung 22: Darstellung der Messgenauigkeit für verschiedene Güteklassen von Sensoren **Links:** 1-sigma-random position drift **Rechts:** 1-sigma random orientation drift

Das Fraunhofer IPA hat Kontakt mit verschiedenen Herstellern von inertialen Messsystemen (Inertial Measurement Units, kurz: IMU) aufgenommen, um technische Möglichkeiten zur Verbesserung der Messgenauigkeit zu besprechen. Gespräche fanden beispielsweise mit den Firmen IMAR und Wuntronic statt, wie auch mit der Fraunhofer-Entwicklungsgruppe TEG. Als Ergebnis konnte festgehalten werden, dass sich zwar durch technische Maßnahmen (beispielsweise eine Redundanz an Sensorik und Fusion durch Kalman-Filterung) eine Verbesserung der Genauigkeit erzielen lässt. Jedoch kommt man auch damit nicht in den vorab geforderten Genauigkeitsbereich.

### 6.2.1 Einbindung des Benutzers

Zusammen mit Herrn Gülle vom ITEP-Sekretariat wurde besprochen, in wie weit man die erzielbare Genauigkeit durch angepasste Verfahren beim Einsatz im Feld verbessern kann. Mehrere Vorschläge wurden Herrn Gülle unterbreitet, die er allesamt als praxistauglich eingestuft hat. Der Vorteil bei diesen Verfahren ist, dass das Positionsmessgerät in regelmäßigen und kurzen Abständen rekaliert werden kann.

**CUPT - Coordinate Update Point:** Ist ein Metallobjekt grundsätzlich erst einmal lokalisiert, kann man den Detektor um das Objekt herumbewegen und dabei zusätzliche Informationen sammeln. Dabei kann man den Detektor so bewegen, dass er immer wieder an einem Referenzpunkt vorbeigeführt wird. Dies kann in der Praxis beispielsweise durch ein senkrecht V-Profil realisiert werden, das sich zwischen den Beinen des Benutzer befindet (siehe Abbildung 23, links). Die Positionsbestimmung kann zusätzlich erleichtert werden, wenn der Benutzer dem Gerät anzeigt, dass es sich gerade über dem Referenzpunkt befindet. Dies könnte beispielsweise durch Drücken eine Knopfes direkt am Haltegriff geschehen (z.B. mit dem Daumen).

**ZUPT - Zero Velocity Update Point:** Ist ein Metallobjekt grundsätzlich erst einmal lokalisiert, kann man den Detektor um das Objekt herumbewegen und dabei zusätzliche Informationen sammeln. Dabei kann man den Detektor so bewegen, dass es an den Umkehrpunkten der Bewegung kurze Ruhepunkte gibt (der Metalldetektor befindet sich dort kurzzeitig in Ruhe, siehe Abbildung 23 rechts); solche Ruhepunkte würden die Genauigkeit der Ortsbestimmung erhöhen. Die Positionsbestimmung könnte zusätzlich erleichtert werden, wenn der Benutzer dem Gerät anzeigt, dass es sich tatsächlich gerade nicht bewegt (dass also gerade einer der Ruhepunkte erreicht ist). Dies könnte beispielsweise durch Drücken eine Knopfes direkt am Haltegriff geschehen (z.B. mit dem Daumen).

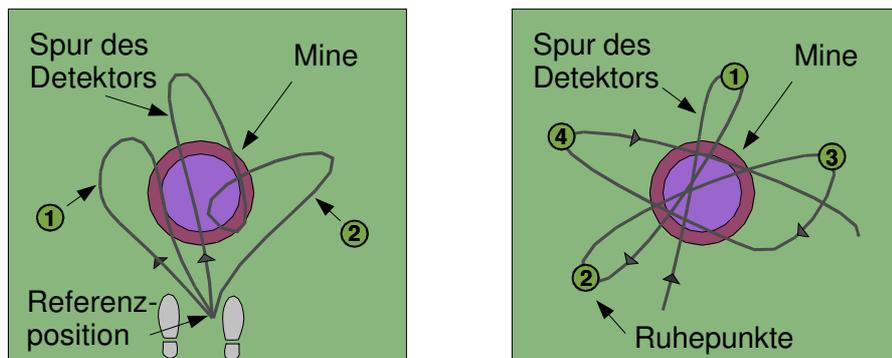


Abbildung 23: Schematische Darstellung zur Bewegung des Metalldetektors über ein fragliches Objekt (Blick von oben). **Links:** Eingezeichnet ist eine Referenzposition, an der der Detektor immer wieder vorbeigeführt wird, wie hier z.B. nach dem Weg (1) und vor dem Weg (2). **Rechts:** Eingezeichnet sind Punkte, bei denen sich der Detektor für kurze Zeit in Ruhe befindet (oder dies leicht möglich ist).

**Kreuzungspunkteverfahren:** Der Minensucher im Feld führt den Metalldetektor so, dass sich die Trajektorien nach kurzen Zeitintervallen schneiden (bei einer 2D-Projektion auf den Boden). An diesen Schnittpunkten sollten bei einer hochgenauen Ortsmessung die Induktions-Messsignale jeweils den gleichen Wert aufweisen (siehe Abbildung 24). Da die Ortsbestimmung mit dem Ortssensor in der Praxis mit ansteigender Zeit stark fehlerbehaftet ist, ergeben sich in der Praxis jedoch deutlich Abweichungen. Das Kreuzungspunkteverfahren gleicht dies aus, indem durch eine Variation der Ortskomponenten eine möglichst gute Übereinstimmung für die Induktionsdaten in der Nähe von Kreuzungspunkten erzielt wird (Details zur Realisierung im nächsten Unterabschnitt).

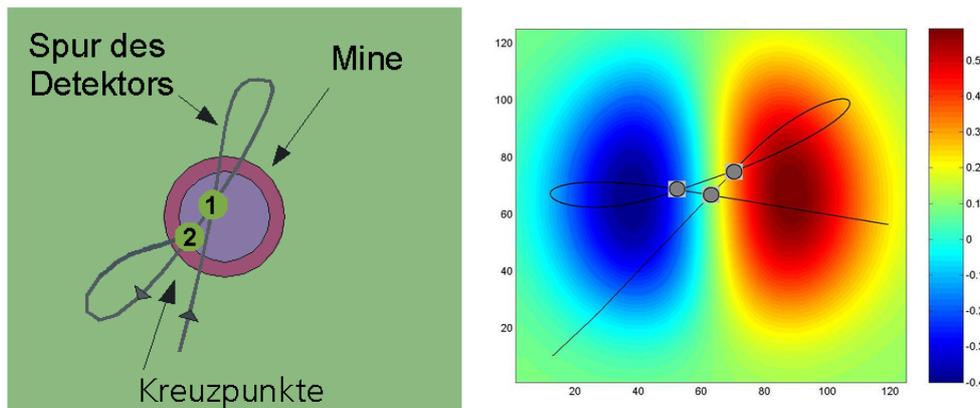


Abbildung 24: **Links:** Schematische Darstellung zur Bewegung des Metalldetektors über ein fragliches Objekt (Blick von oben). Eingezeichnet sind zwei Kreuzpunkte, an denen der Detektor wieder vorbeigeführt wird. **Rechts:** Dazugehöriges Messdatenbild.

### 6.3 Numerische Simulation zur Unterstützung durch den Benutzer

Durch die verschiedenen Unterstützungsmethoden, die im vorherigen Abschnitt beschrieben wurden, stehen zusätzliche Informationen zu der Bewegung des Metalldetektors zur Verfügung. Es ist leicht einsichtig, dass der Messfehler in der Ortsbestimmung dadurch qualitativ verringert werden kann. Um diese Verbesserung auch quantitativ bestimmen zu können, wurde am Fraunhofer IPA eine numerische Simulation zu diesem Thema implementiert und evaluiert.

Die zentrale Fragestellung für die numerische Simulation war, welchen Einfluss das CUPT-Verfahren wie auch das Kreuzungspunktverfahren auf die Messgenauigkeit in der Ortsbestimmung haben.

Die Simulationen waren ein zusätzlicher Arbeitspunkt, der im ursprünglichen Arbeitsplan so nicht vorgesehen war; aufgrund der ermittelten Ergebnisse ist im Gegenzug der Aufbau eines realen Messsystems weggefallen.

#### 6.3.1 Algorithmen

Aus mathematischer Sicht besteht der Algorithmus aus den folgenden Komponenten:

- Generierung einer idealen Bahnkurve
- Verfälschung der Bahnkurve
- Anwendung von CUPT und/oder Kreuzungspunktoptimierung
- Statistische Auswertung über ein Ensemble von Bewegungen

**Generierung und Verfälschung der Bahnkurven:** Als erster Schritt in der Realisierung der Simulation wird durch den Benutzer eine Bahnkurve vorgegeben (mit Hilfe einer interaktiven Benutzeroberfläche), die auf einen hinterlegten realen Messdatensatz angewendet wird. Der Benutzer kann auf diese Weise verschiedene Strategien für die Bewegung des Metalldetektors evaluieren. Die Bahnkurven werden im Weiteren auf Basis des Fehlermodells (inkl. Gauß'verteilter Statistik für die Driftkomponente) verfälscht (siehe Abbildung 25).

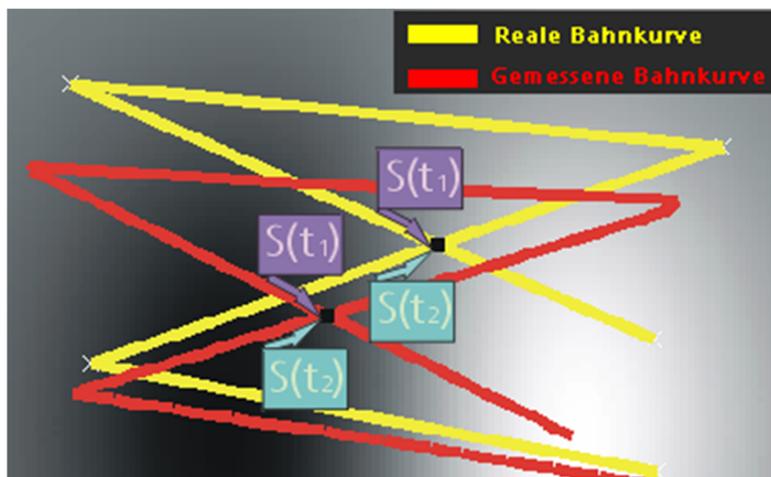


Abbildung 25: Eingegebene Bahnkurve (rot) und fehlerbehaftete Bahnkurve (gelb), jeweils Blick von oben.

**Simulation für CUPT:** Der Endpunkt der verfälschten Bahnkurve ist aufgrund der CUPT-Randbedingung genau bekannt. Es wird eine Korrektur des Endpunkts durchgeführt, durch eine quadratische Interpolation für alle Messpunkte entlang der Kurve.

**Simulation für die Optimierung mit Kreuzungspunkten:** Die Kreuzungspunkte entlang der fehlerbehafteten Bahnkurven sind charakterisiert durch  $S(t_1) \neq S(t_2)$ , wobei  $t_1$  und  $t_2$  die zwei Zeitpunkte zu einem gegebenem Kreuzungspunkt sind. Mittels eines Optimierungsalgorithmus wird die Signaldifferenz zu allen Kreuzungspunkten minimiert: Das Qualitätskriterium  $Q$  während der Optimierung ist die Summe der Signaldifferenzen  $\Delta S_i$  an den  $N$  Kreuzungspunkten  $I_1, I_2, I_3 \dots I_N$ :

$$Q = \sum_{i=0}^N \Delta S_i$$

Als Minimierungsverfahren kommt ein Downhill-Simplex-Verfahren zum Einsatz. Ausgehend von einem als fehlerfrei angenommenem Startwert zu der Zeit  $t_0=0$  wird der Endpunkt der Bewegung  $M(x, y)$  optimiert, d.h. das Qualitätskriterium wird minimiert.

Der Startwert für  $M(x, y)$  wird dabei aus einer Gaußverteilung gewählt, die im Mittel eine typischen Abweichung für die Bahnkurve erzeugt (3 cm in 3 s). Mit dem resultierenden  $M(x, y)$  wird eine quadratische Interpolation für alle anderen Punkte auf der Kurve durchgeführt.

**Simulation für die Optimierung mit Kreuzungspunkten und CUPT:** Der Unterschied zwischen dem Kreuzungspunktverfahren allein und dem CUPT-Verfahren ist, dass der Endpunkt der Bewegung aufgrund der CUPT-Randbedingung genau bekannt ist. Dazwischen wird die Bewegung variiert, erneut basierend auf der genannten Statistik und einer quadratischen Interpolation auf den festen Endwert.

### 6.3.2 Implementierung

Als Implementierungsumgebung für die Simulation wurde Matlab gewählt. Das implementierte Simulationsprogramm »SimMD« ist durch eine Interaktive Benutzeroberfläche bedienbar (siehe Abbildung 26).

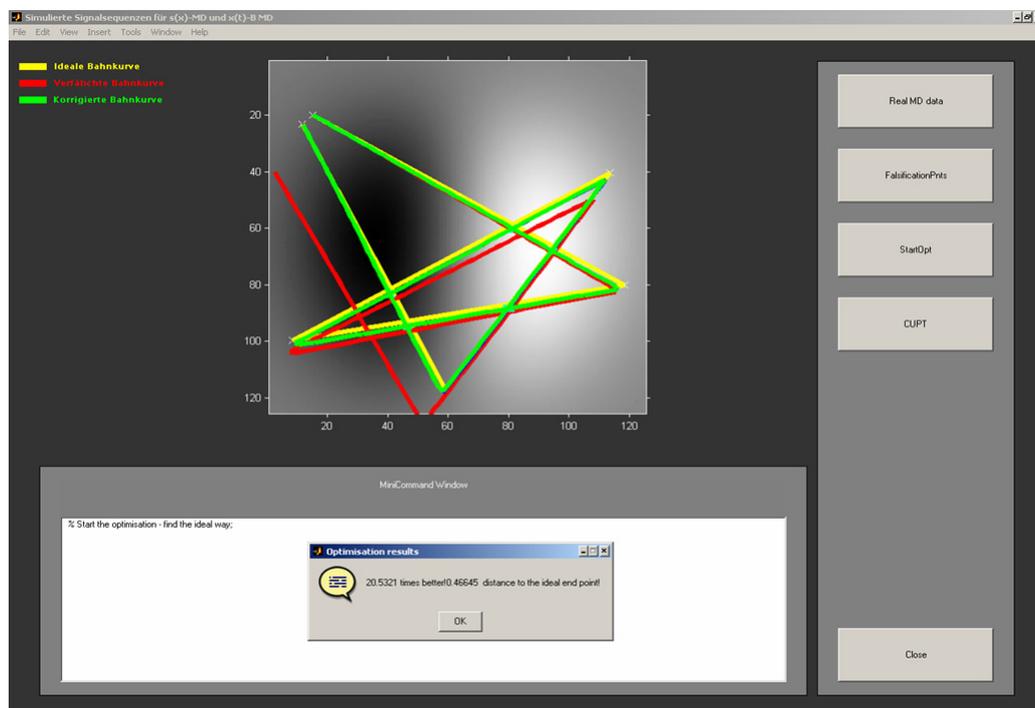


Abbildung 26: Benutzeroberfläche von »SimMD«

### 6.3.3 Ergebnisse der Simulationen

Das Auswertungskriterium des Simulationsprogramms ist das Verhältnis zwischen dem mittleren quadratischen Fehler entlang einer Bahnkurve vor und nach der Optimierung:

$$Erg = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (\vec{r}_{\text{verfälscht}} - \vec{r}_{\text{ideal}})^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (\vec{r}_{\text{optimiert}} - \vec{r}_{\text{ideal}})^2}}$$

Es wurden drei verschiedene Verfahrenwege untersucht, die im Vorfeld als einfach realisierbar bzw. als konzeptionell leistungsfähig identifiziert wurden (siehe Abbildung 27): Der Verfahrenweg Nr. 2 sollte beim CUPT-Verfahren zu guten Ergebnissen führen, der Verfahrenweg Nr. 3 hingegen beim Kreuzungspunktverfahren.

Um die statistische Komponente zu berücksichtigen, wurden für jeden Verfahrenweg mehrere Realisierungen getestet und für verschiedene Realisierungen unterschiedliche Verfälschungen (typisch 800) generiert und ausgewertet.

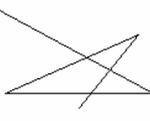
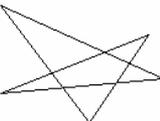
Verfahrenwege Methode	1.	2.	3.
<b>SIM</b> Quadratische Interpolation			
<b>SIM</b> Quadratische Interpolation	2.56	2.11	3.215
✦ <b>CUPT</b> Quadratische Interpolation	<b>4.34</b>	<b>4.443</b>	<b>4.499</b>
<b>SIM + CUPT</b> Quadratische Interpolation	3.911	<b>4.09</b>	✦ 4.63

Abbildung 27: Ergebnisse zu den numerischen Simulationen. Die Ergebnisse sind jeweils als multiplikativer Faktor zur erzielten Verbesserung der Ortsungenaugigkeit dargestellt.

Der Abbildung 27 kann man die Ergebnisse der Simulation entnehmen. Demnach kann die Ortsungenauigkeit bei einer geeigneten Wahl des Verfahrenswegs um etwa einen Faktor 4,5 bis 5 verbessert werden. Absolut gesehen kann der Fehler mit den genannten Verfahren auf etwa 1 cm während 4 bis 5 s Messzeit reduziert werden.

#### **6.4 Zusammenfassung**

Beim Einsatz von MEMS-Beschleunigungssensoren für die Ortsbestimmung treten auch bei sorgfältiger Auswahl der Bewegung des Metalldetektors Messungenauigkeiten auf, die einen praktischen Einsatz dieser Technologie aktuell verhindern. Dies trifft auf das implementierte Fehlermodell zu, das als einfache Modellannahme nur die wichtigsten Fehlerquellen berücksichtigt (insbesondere Drift und Bias). Bei realen Messungen ist vermutlich davon auszugehen, dass die Messdaten noch etwas schlechter ausfallen.

Die hier genannte Untersuchung wurde im Jahr 2004 durchgeführt. Eine erneute Analyse zu den kommerziell verfügbaren MEMS-Sensoren im Jahr 2006 hat zwar ergeben, dass verbesserte Sensoren verfügbar sind. Allerdings hat sich die erzielbare Messungenauigkeit dadurch nur geringfügig verbessert.

Das zentrale Ergebnis dieses Arbeitspakets ist somit, dass es gegenwärtig kein kommerziell verfügbares System gibt, das die notwendigen Anforderungen erfüllt und zudem im geometrischen (Größe) und finanziellen Rahmen bleibt.

## 7 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse

### 7.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Die methodischen Neuentwicklungen sind im engen Bezug zu herkömmlichen Metall-detektoren der drei deutschen Hersteller Ebinger GmbH in Köln, Institut Dr. Förster Prüfgerätebau GmbH & Co KG in Reutlingen sowie Vallon GmbH in Eningen entwickelt worden, die diese für die Verwendung im Vorhaben mit einer geeigneten Datenschnittstelle versehen hatten. Nach Abschluss der Entwicklungsarbeiten wurden diese Firmen einzeln über die produktspezifischen Ergebnisse informiert, bei denen auch die Ergebnisse des Fraunhofer IPA präsentiert wurden.

Aus Sicht des Fraunhofer IPA konnten insbesondere mit einer der drei Firmen Themenbereiche identifiziert werden, in denen eine zukünftige Zusammenarbeit möglich erscheint. Diese Zusammenarbeit wird ggf. als nachfolgende bilaterale Zusammenarbeit gestaltet werden.

### 7.2 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

Der Arbeitsfortschritt und die Ergebnisse des Vorhabens sind der wissenschaftlichen Community durch eine aktive Teilnahme an Konferenzen und Workshops vorgestellt worden, wodurch die Verbesserung des Stands der Technik dokumentiert wurde.

### 7.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die entwickelten Methoden aus den Bereichen Signalanalyse und Inversion wie auch die numerischen Verfahren zur Lösung von Differentialgleichungen sind universelle Tools. Fortschritte bei diesen Methoden können auch in andere F&E-Bereiche übertragen werden, und dort zudem wirtschaftlich und wissenschaftlich verwertet werden.

Ein thematisch benachbartes Themengebiet ist die Sicherheitstechnik, in dem ebenfalls Metalldetektoren zum Einsatz kommen. Es wird gegenwärtig vom Fraunhofer IPA geprüft, inwieweit in diesem Bereich eine wissenschaftliche oder wirtschaftliche Anschlussförderung möglich ist.

Die Ergebnisse zum symmetriebasierten Pin-Pointing können gut auf den Bereich der Bildverarbeitung übertragen werden, wo Symmetrie ein wichtiges Konzept darstellt (als Indikator zur Identifikation von Aufmerksamkeitszentren, etc.)

## 8 Ergebnisse Dritter

Während der Projektlaufzeit sind dem Fraunhofer IPA keine Projektergebnisse (mit Bezug zu den bearbeiteten Themen) bekannt geworden, die außerhalb des Projektverbunds erzielt worden wären.

## 9 Veröffentlichung der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Fraunhofer IPA wurden auf folgender Konferenz präsentiert:

- Eigenbrod, H., “Metal Object Localisation and Discrimination by Extended Symmetry and Phase Features”, In: Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung u.a.: 9th European Conference on NDT. ECNDT Berlin 2006 / CD-ROM : DGZfP-Proceedings BB 103-CD, September 25-29, 2006, Berlin.

Darüber hinaus sind die Ergebnisse auch als Bestandteil in den Übersichtsvorträgen enthalten, die das Fraunhofer-Institut IPA als koordinierendes Institut zentral veröffentlicht hat:

- Eigenbrod, H., “Project Network HuMin/MD - Advanced Data Analysis Methods for Metal Detectors”, EUROEM 2004, 12-16 July 2004, Magdeburg, Germany.
- Midterm-Summary Report (2006), abrufbar über <http://www.humin-md.de>
- Eigenbrod, H., “Advanced Data Analysis Methods for Metal Detectors – Results of the Project Network HuMin/MD”, BAM-ITEP-Workshop on “Reliability Tests for Demining”, 30-31 January 2007, Berlin.
- Final Meeting Presentations (2007), abrufbar über <http://www.humin-md.de>

## Anhang A: Relevante Systemparameter für IMS-Sensoren

### Tabelle Beschleunigungssensoren

Parameter	Einh.	Beschreibung
Acceleration	g	Messwertbereich des Sensors
Max. accel	g	Maximal messbare Beschleunigung
Bias initial un- certainty	g	Messunsicherheit bei ruhendem Beschleunigungssensor
Bias stability	g/h <sup>1/2</sup>	Drift bei ruhendem Beschleunigungssensor
Scale	ppm	Linearität der Skalierung zwischen Beschleunigung und Spannung (als Geräte-Output)
Misalignment	°	Achsen stehen nicht senkrecht aufeinander
Bandwidth	Hz	Bandbreite des Sensors (typische Größe 100 Hz)

### Tabelle Drehratensensoren

Parameter	Einh.	Beschreibung
Drehrate	°/h	Messwertbereich des Sensors
Bias initial un- certainty	°/h	Messunsicherheit bei ruhendem Drehratensensor
Bias stability	°/h	Drift bei ruhendem Drehratensensor
Angular Ran- dom Noise	°/h <sup>1/2</sup>	Maß für den Winkelfehler, der sich durch die Integration der rauschbehafteten Drehrate ergibt. Der Winkelfehler skaliert mit der Wurzel aus der (Integrations-) Zeit. Die Standardabweichung der Verteilung nach einer gewissen Zeit ergibt sich aus: ARW*Zeit <sup>1/2</sup> . Eine Umrechnung in frequenzbasierte Größen ist möglich, z.B. PSD oder FFT Noise Density. Einheiten sind dann: (°/h) <sup>2</sup> /Hz bzw. (°/h)/Hz <sup>1/2</sup> .
Scale	ppm	Linearität der Skalierung zwischen Drehrate und Spannung (als Geräte-Output)
Misalignment	°	Achsen stehen nicht senkrecht aufeinander
Bandwidth	Hz	Bandbreite des Sensors (typische Größe 100 Hz)