

Ortung von Altmunition im Meer

Beiträge aus der Forschungsarbeit der WTD 71

Ein Beitrag von UWE KRETSCHMER und WOLFGANG JANS

Um Altmunition im Meer zeitnah unter Einbeziehung wirtschaftlicher Aspekte entsorgen zu können, muss diese mittels Sonar, magnetischem Sensor oder durch weitere Verfahren räumlich detektiert und nach Möglichkeit klassifiziert werden. Dafür sind neben den geeigneten Sensoren intelligente Auswertestrategien zur automatischen Lokalisierung, Klassifikation und ggf. Identifikation von großer Bedeutung. Bedingt durch die große räumliche Ausdehnung der vorhandenen Altmunition werden effiziente Systeme benötigt, die aus physikalischen Gründen und aus Kostengründen bevorzugt auf einem tiefenvariablen autonomen Unterwasserfahrzeug als Sensorträger eingesetzt werden sollten.

Autoren

Dr. Uwe Kretschmer ist bei der WTD 71 Geschäftsbereichsleiter Unterwasserortung und Kommunikation. Dr. Wolfgang Jans ist dort Dezernent für neue Technologien und Verfahren, Asymmetric Warfare

UweKretschmer
@bundeswehr.org
WolfgangJans@bundeswehr.org

Abb. 1: FS »Planet«



©WTD71

WTD 71 | BAAINBw | MCM-AUV | ATR | Minenjagd | Altmunition | SOAM | SAS | DPCA-Algorithmus Seitensichtsonar | Kolberger Heide | BOSS | parametrisches Echolot | Magnetik | Totalfeldmagnetometer

Die WTD 71

Die Wehrtechnische Dienststelle der Bundeswehr für Schiffe und Marinewaffen, Maritime Technologie und Forschung (WTD 71) ist eine Bundeseinrichtung mit Ressortforschungsaufgaben, die dem Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnologie und Nutzung der Bundeswehr (BAAINBw) unterstellt ist.

Die WTD 71 ist in den verschiedenen Phasen des Entstehungsgangs von maritimer Ausrüstung für das BAAINBw tätig.

In der *Analysephase* sind Forschungs- und Technologieaufgaben von Bedeutung. In enger Zusammenarbeit mit nationalen und internationalen Forschungseinrichtungen werden vor allem Fragestellungen der Aufklärung und der Kommunikation unter Wasser untersucht, die aus physikalischen Gründen auf Wasserschall angewiesen sind. Dabei basieren die Arbeiten auf den beiden Hauptsäulen Seeversuch und Simulation. Seeversuche dienen der Gewinnung von Messdaten zur Entwicklung bzw. Validierung von Modellen und zur Verifizierung von Signalverarbeitungsverfahren und Kommunikationskonzepten. Hauptplattform für die Forschung ist das Forschungsschiff (FS) »Planet«, eines der leisesten Forschungsschiffe der Welt (Abb. 1). Verbunden mit ihrer Hochseetauglichkeit

bietet FS »Planet« ideale Voraussetzungen für die erforderlichen Experimente in See.

Mit ihrem Forschungsprogramm ist die WTD 71 als Ressortforschungseinrichtung tätig und erfolgreich vom Wissenschaftsrat evaluiert. Das Forschungsprogramm umfasst fünf Schwerpunkte:

- Maritime Umwelt,
- akustische Modellierungen,
- tieffrequente Sonaranwendungen,
- hochfrequente Sonaranwendungen,
- Signaturen.

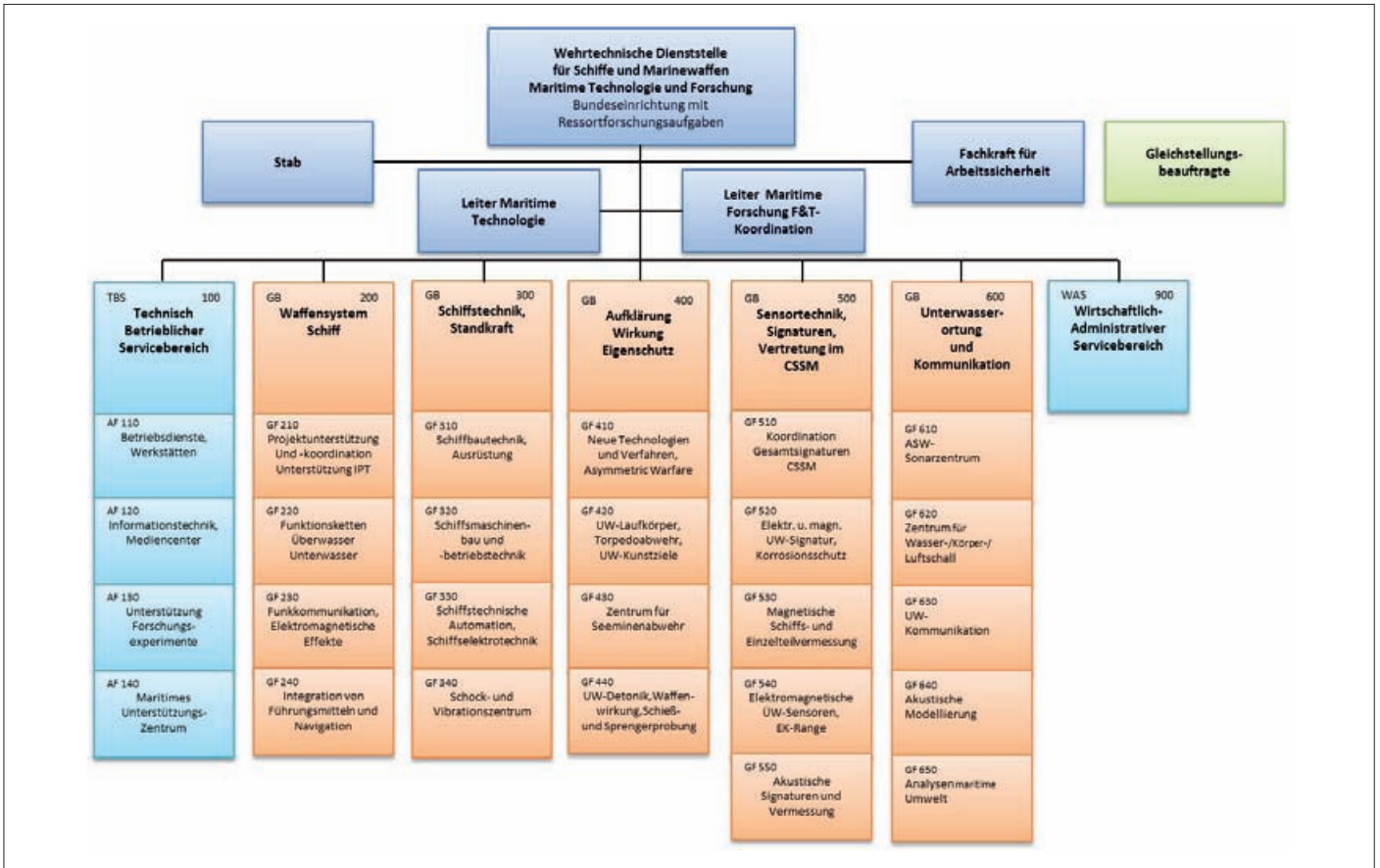
In der *Realisierungsphase* unterstützt die WTD 71 das Projektmanagement bei der Erarbeitung von Prüfspezifikation und ist verantwortlich für die integrierte Nachweisführung und die Abnahmen.

Zudem ist die WTD 71 auch in der *Nutzungsphase* gefordert. Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter bringen ihre Erfahrungen und Fähigkeiten bei der Erarbeitung von Lösungen für Obsoleszenzen ein.

Zur Erfüllung ihrer Aufgaben bedient sich die WTD 71 der in Abb. 2 gezeigten Struktur. In den fünf operativen Geschäftsbereichen »Waffensystem Schiff«, »Schiffstechnik und Standkraft«, »Aufklärung, Wirkung und Eigenschutz«, »Sensortechnik, Signaturen und Vertretung im CSSM« sowie »Unterwasserortung und Kommunikation« werden Forschungs- und Fachtechnikaufgaben eng verzahnt durchgeführt.

Rund 600 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter setzen ihr Know-how zur Entwicklung, Erprobung und Beschaffung von Marinewaffensystemen ein. Wissenschaftler und Ingenieure, gut ausgebildete und erfahrene Techniker, Handwerker, Seeleute und Unterstützungspersonal machen die WTD 71 zur Fachkapazität im gesamten Marine-Rüstungsbereich.

Exemplarisch sei das Forschungsgebiet »hochfrequente Sonaranwendungen« zum Zwecke der Minenjagd genannt. Dieses Gebiet hat zudem Dual-use-Potenzial zur Detektion, Klassifikation und Identifikation von Altmunition in Nord- und



© WTD 71

Abb. 2: Struktur der WTD 71

Ostsee aus den beiden Weltkriegen. Die WTD 71 liefert aufbauend auf Ergebnissen dieses Forschungsgebietes wesentliche Ansätze wie hochauflösende Sonarverfahren und automatische Zielauswertung (ATR), die sich auf die Problematik der Ortung von Altmunition im Meer anwenden lassen.

Einführung zu MCM-AUVs

Aus militärischer Sicht sind Seeminen ein günstiges und weit verbreitetes Seekriegsmittel. In der einfachsten Form sind sie als improvisierte Unterwassersprengfallen (improvised explosive devices – IEDs) denkbar und stellen eine sehr effektive Bedrohung für alle Marinen und den freien Seehandel dar.

Für die Detektion und Beseitigung dieser Seeminen werden traditionell unter anderem schiffsgebundene Systeme zur Minenjagd (mine counter measure – MCM) eingesetzt. Dem technologischen Trend folgend, gewinnen aber auch zunehmend seegehende autonome Fahrzeuge (autonomous vehicles – AxVs) für diese Aufgaben an Bedeutung. Kernkomponenten sind dabei autonome Unterwasserfahrzeuge (autonomous underwater vehicles – AUVs) zur Aufklärung, die ein möglichst hochaufgelöstes Bild des Meeresbodens liefern müssen, um eine sichere Detektion und ggf. Klassifikation von auf dem Meeresboden aufliegenden Objekten in kurzer Zeit zu gewährleisten.

Aus militärischer Sicht sind solche MCM-AUVs von hohem Interesse, da ihr Einsatz die Gefähr-

dung von Personal drastisch reduziert. Daher wird die Eignung solcher Systeme für die Anwendung in der deutschen Marine seit ca. 10 Jahren von der WTD 71 mit zunehmender Intensität untersucht. Bis heute standen bzw. stehen der WTD 71 dafür unter anderem das AUV REMUS 100 mit dem konventionellen Marine-Sonic-Seitensichtsonar, das AUV HUGIN mit dem HISAS-SAS-Sonar bzw. SeaOtter MK II mit dem Vision-1200-SAS-Sonar sowie zwei AUVs SeaCat mit unterschiedlicher Sensorkonfiguration zur Verfügung.

Die für diese AUVs geeignete hochauflösende Sensortechnologie ist die Synthetische-Apertursonar-Verarbeitung für Seitensichtsonare, die sich seit ca. 15 Jahren in der Entwicklung befindet (synthetic aperture sonar – SAS). Anfänglich wurde aufgrund der erforderlichen Computerleistung die SAS-Verarbeitung und damit die Bildgenerierung nach der Rückkehr des eingesetzten AUVs im Anschluss an die AUV-Mission durchgeführt. Aufgrund der rasanten technologischen Entwicklung im Rechnerbereich erfolgt die Bildgenerierung heute oft bereits in Realzeit während der AUV-Mission.

Weitere in der Entwicklung befindliche rechnergestützte neue Fähigkeiten für AUVs sind die realzeitfähige automatische Zielerkennung (automatic target recognition – ATR), die autonome, umweltabhängige Missionsanpassung (autonomous survey adaption) und die digitale Unterwasserkommunikation (underwater communication – UWC).

Kritische technologische Komponenten – wie z. B. die SAS-Signal- bzw. ATR-Bildverarbeitung –

werden in den beiden Forschungsvorhaben »Moderne Sonarverfahren für die Minenjagd« bzw. »Automatic Target Recognition für MCM« innerhalb des Forschungsprogramms der WTD 71 näher wissenschaftlich untersucht und weiterentwickelt. Dabei gehen die Forschungsaktivitäten über rein den Meeresboden abbildende Sonare hinaus und beziehen tieffrequente in den Meeresboden eindringende Sonare mit ein.

Die Fähigkeiten von AUVs mit den zugehörigen Technologien SAS und ATR führen zudem dazu, dass diese Fahrzeuge ebenfalls für viele weitere zivile Bereiche von großem Interesse sind, in denen Objekte auf dem oder am Meeres-, See- oder Flussboden gesucht werden bzw. eine Inspektion dieser Objekte durchgeführt werden muss. So wurden AUVs bisher z. B. eingesetzt für die Inspektion von Wracks (wie z. B. von den versenkten Munitionstransportern im Skagerrak), für die Suche nach über Bord gegangenen Objekten oder nach Flugzeugresten (wie z. B. von dem 2009 über dem Atlantik abgestürzten Airbus 330 des Fluges AF447 oder der 1940 über der Godwin-Sandbank im Ärmelkanal notgelandeten Dornier Do17), für die Suche nach auf dem Meeresboden aufliegender Altmunitionsteile, für die Inspektion von Offshore-Infrastruktur (wie z. B. von Seekabeln und Pipelines) oder für die hydrographische Kartierung des Meeresbodens.

Im Rahmen der Amtshilfe hat die WTD 71 in den letzten Jahren mehrfach die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes bzw. das Ministerium für Energiewirtschaft, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (MELUR) des Landes Schleswig-Holstein unterstützt.

Entsprechende Arbeiten der WTD 71, die mit dem AUV HUGIN mit dem HISAS-Sonar in der Kieker Förde und in dem Munitionsversenkungsgebiet Kolberger Heide in den Jahren 2012 und 2013 durchgeführt wurden, wurden in dem Beitrag »Autonome Unterwasserfahrzeuge mit SAS-Technologie« auszugsweise vorgestellt (Frenz 2014).

Wie dargestellt sind die für die Detektion von Altmunition in See möglichen technischen Lösungsansätze eng mit den Sonarverfahren in der Minenjagd verwandt. Damit können Untersuchungen zur Detektion von Altmunition im Rahmen der geltenden Regeln von den im Bereich der Minenjagd verfügbaren Erfahrungen und Erkenntnissen profitieren. Umgekehrt sind die im Bereich der Altmunition gewonnenen Erkenntnisse aber genauso für die Marine von unmittelbarem Interesse. Daraus resultierte, dass sich die WTD 71 in den Jahren 2012 bis 2015 an dem durch das Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi) geförderten Verbundvorhaben »Berührungsfreie Sondierung von Gewässeruntergründen zwecks Auffindung von Altmunition und anderen Gefahrstoffen zur Gewährleistung der gefahrenlosen Gründung von Offshore-Windenergieanlagen« (kurz SOAM) unter Federführung des CUTEC Institutes in Clausthal-Zellerfeld neben den Firmen Heinrich Hirdes EOD

Services GmbH, Hamburg, und Atlas Elektronik GmbH, Bremen, beteiligt hat. Motivation des Vorhabens war, dass z. B. der Aus- und Aufbau von Offshore-Windparks voraussetzt, dass die dafür genutzten Seegebiete sicher sind, das heißt unter anderem frei von Munitionsaltlasten, und kosteneffizient erschlossen und »bebaut« werden können.

Der sicheren Nutzung von Meeresböden in Nord- und Ostsee steht allerdings entgegen, dass in diesen Gewässern Tausende von Tonnen Altmunition lagern und verrotten. Dabei handelt es sich um Blindgänger sowie um verlorengegangene oder entsorgte Munition aus der Kriegszeit. Nach den beiden Weltkriegen wurden zudem nicht mehr benötigte Munitionsbestände aus unterschiedlichsten Quellen unter Aufsicht der Alliierten verklappt. Alleine aus Deutschland wurden nach dem Zweiten Weltkrieg schätzungsweise ca. 1 800 000 t konventioneller und ca. 230 000 t chemischer Munition im Meer entsorgt. Dieses ist dem Bericht »Munitionsbelastung der deutschen Meeresgewässer – Bestandsaufnahme und Empfehlungen« des Expertenkreises Munition im Meer unter dem Dach des Bund/Länder-Ausschusses Nord- und Ostsee (kurz BLANO) aus dem Jahr 2011 zu entnehmen, der jährlich fortgeschrieben wird (Böttcher et. al. 2011).

Da die Altmunition in Nord- und Ostsee bis auf wenige Ausnahmen vor 60 oder mehr Jahren ins Meer gelangte, ist sie bedingt durch Sedimenttransportprozesse oder andere (Umwelt-)Einflüsse im Meer oft ganz oder teilweise versandet bzw. in den Meeresboden eingesunken. Daher fanden sich für das SOAM-Projekt Partner mit unterschiedlichen Kompetenzbereichen (Sensorik, Software, maritime Technologie, AUVs) zusammen, um einen Beitrag zum Auffinden von insbesondere dieser im Meeresboden eingesunkenen Altmunition zu leisten.

Hier besteht ein Unterschied zur Minenjagd, da Seeminen aufgrund der kürzeren Verbringungszeit oft auf dem Meeresboden liegen. Einen weiteren Unterschied stellt das Größenspektrum der im Meer verbrachten Altmunition dar, welches von der Gewehrpatrone über Artilleriegeschosse bis hin zu V1-Flugkörpern, Seeminen oder Torpedos reicht. Damit ist das Zielspektrum für die Detektion deutlich breiter als im Bereich der Minenjagd.

Zwei der auch im Rahmen des SOAM-Projektes als Sensorträger und Demonstratoren eingesetzten AUVs – das SeaCat-AUV mit einem Raman-Spektrometer-Sensorkopf und das DeepDiver-AUV SeaHorse mit tief- und hochfrequentem Fächer-echolot wurden kürzlich im Beitrag »Einsatz von AUVs als anwendungsorientierte Sensorplattformen« vorgestellt (Stavenhagen 2015). Im Folgenden soll die für die Detektion von Altmunition derzeit bzw. zukünftig nutzbare Sensorik näher betrachtet werden. Dieses wird sich auf hochfrequente, den Meeresboden abbildende Sonare, auf tieffrequente, in den Meeresboden eindringende

Literatur

- Böttcher, Claus; Tobias Knobloch; Niels-Peter Rühl; Jens Sternheim; Uwe Wichert; Joachim Wöhler (2011): Munitionsbelastung der deutschen Meeresgewässer – Bestandsaufnahme und Empfehlungen; Sekretariat Bund/Länder-Messprogramm für die Meeresumwelt von Nord- und Ostsee (BLMP), 172 S.
- Frenz, Uwe (2014): Autonome Unterwasserfahrzeuge mit SAS-Technologie; HN 97, S. 11–16
- Stavenhagen, Alexander (2015): Einsatz von AUVs als anwendungsorientierte Sensorplattformen; HN 102, S. 6–9

Sonare, auf Totalfeldmagnetometer und auf elektrochemische Sensoren beziehen.

Hochfrequente, den Meeresboden abbildende Sonare

Parallel zur Entwicklung autonomer Unterwasserfahrzeuge hat sich die SAS-Signalverarbeitung für die Seitensichtsonare in den letzten 15 Jahren zum Hauptsensor dieser Fahrzeuge entwickelt. Ein Beispiel für die Leistungsfähigkeit zeigt das Seitensichtsonarbild in Abb. 3. Das Bild wurde mit dem MUSCLE-System des NATO-Forschungsinstitutes CMRE in LaSpezia in Italien aufgenommen.

Wie jedes typische Seitensichtsonarbild weist auch Abb. 3 hinter dem Wrack der »Equa« (auf der rechten Seite) aufgrund des streifenden Einfalls des Schalls einen Schatten auf. Das AUV bewegte sich bei der Datenaufnahme auf der linken Seite des Wracks im Bild von unten nach oben. Dieses SAS-Bild besitzt im Vergleich zu dem Bild eines vergleichbaren konventionellen Seitensichtsonars eine um etwa eine Größenordnung höhere laterale Auflösung, sodass viele Details des Wracks erkennbar sind. Diese hohe Auflösung des SAS-Sonars unterstützt insbesondere auch die Möglichkeit, auf dem Meeresboden aufliegende kleinere Objekte zu unterscheiden – das heißt zu klassifizieren. Typischerweise liegt die Auflösung eines SAS-Bildes bei ca. 2 bis 4 cm in Fahrtrichtung und quer dazu, sie ist zudem unabhängig von der Querentfernung und Sonarfrequenz.

Erreicht wird das hohe Auflösungsvermögen eines SAS-fähigen Seitensichtsonars dadurch, dass eine geeignete Signalverarbeitung die Empfangssignale einer Serie von aufeinanderfolgenden Lotperioden kohärent – das heißt phasenrichtig – aufaddiert. Diese bewirkt für Seitensichtsonare eine synthetische Verlängerung der genutzten physikalischen Antenne und damit den beschriebenen Auflösungsgewinn. Im Vergleich zu der ca. 1 m langen physikalischen Antenne beträgt die synthetische Aperturlänge

dabei typischerweise einige 10 m. Zu den wichtigsten Signalverarbeitungsschritten für die SAS-Verarbeitung gehören:

- Die Schätzung der Bewegung der physikalischen Seitensichtsonarantenne auf dem AUV von Lotperiode zu Lotperiode längs der Bahn des AUV, um Signale phasenrichtig überlagern zu können. Dafür wird insbesondere eine datengetriebene Schätzmethode – der »Displaced Phased Center Array«-Algorithmus (kurz DPCA-Algorithmus) – genutzt, da selbst die besten auf dem Markt verfügbaren Inertialnavigationssysteme dafür keine ausreichende Genauigkeit besitzen.
- Die synthetische Aperturbildgenerierung durch phasenrichtige Überlagerung einer Serie von Lotperioden einschließlich Fokussierung in den verschiedenen Querentfernungsbereichen.
- Gegebenenfalls sogenannte Auto-Fokus-Algorithmen, um unscharfe Bildbereiche nachbearbeiten zu können.

Die Qualität eines SAS-Bildes hängt kritisch von der Güte ab, mit der die Position der physikalischen Seitensichtsonarantenne längs der Bahn des AUV für die gesamte synthetische Apertur geschätzt werden kann. Abweichungen von der in der Regel angenommenen geraden Bahn des AUV müssen von Lotperiode zu Lotperiode mittels des DPCA-Algorithmus geschätzt und korrigiert werden. Da dabei die auftretenden Schätzfehler mit der Anzahl der betrachteten Lotperioden wachsen, erfolgt zudem eine Stützung der Signalbearbeitung mittels Kalmanfilter über eine hochgenaue Inertialnavigationplattform bezüglich z. B. des Kurswinkels des Fahrzeuges.

Typische Frequenzen eines SAS-fähigen Seitensichtsonars liegen im Bereich von 100 bis 300 kHz. Für ein angenommenes 200-kHz-System beträgt die erforderliche Genauigkeit für die Bahnschätzung längs der gesamten synthetischen Aper-

Abb. 3: Wrack des U-Jägers »Equa« vor Riomaggiore, Italien, aufgenommen mit dem MUSCLE-SAS-System des CMRE im Rahmen des durch das NATO-ACT finanzierten »Autonomous mine search program« bzw. des internationalen NATO-Forschungsprojekts »Machine Intelligence for Autonomous Mine Search« (MIAMS), an dem auch die WTD 71 beteiligt ist



Data: MUSCLE SAS (CMRE, LaSpezia)

Ship wreck submarine chaser EQUA
Sunk 10 June 1944 at Riomaggiore, Italy
Dimensions 40x7x7 m

tur ca. 1/16 der Sonarwellenlänge – oder absolut ca. 0,5 mm über einige 10 m.

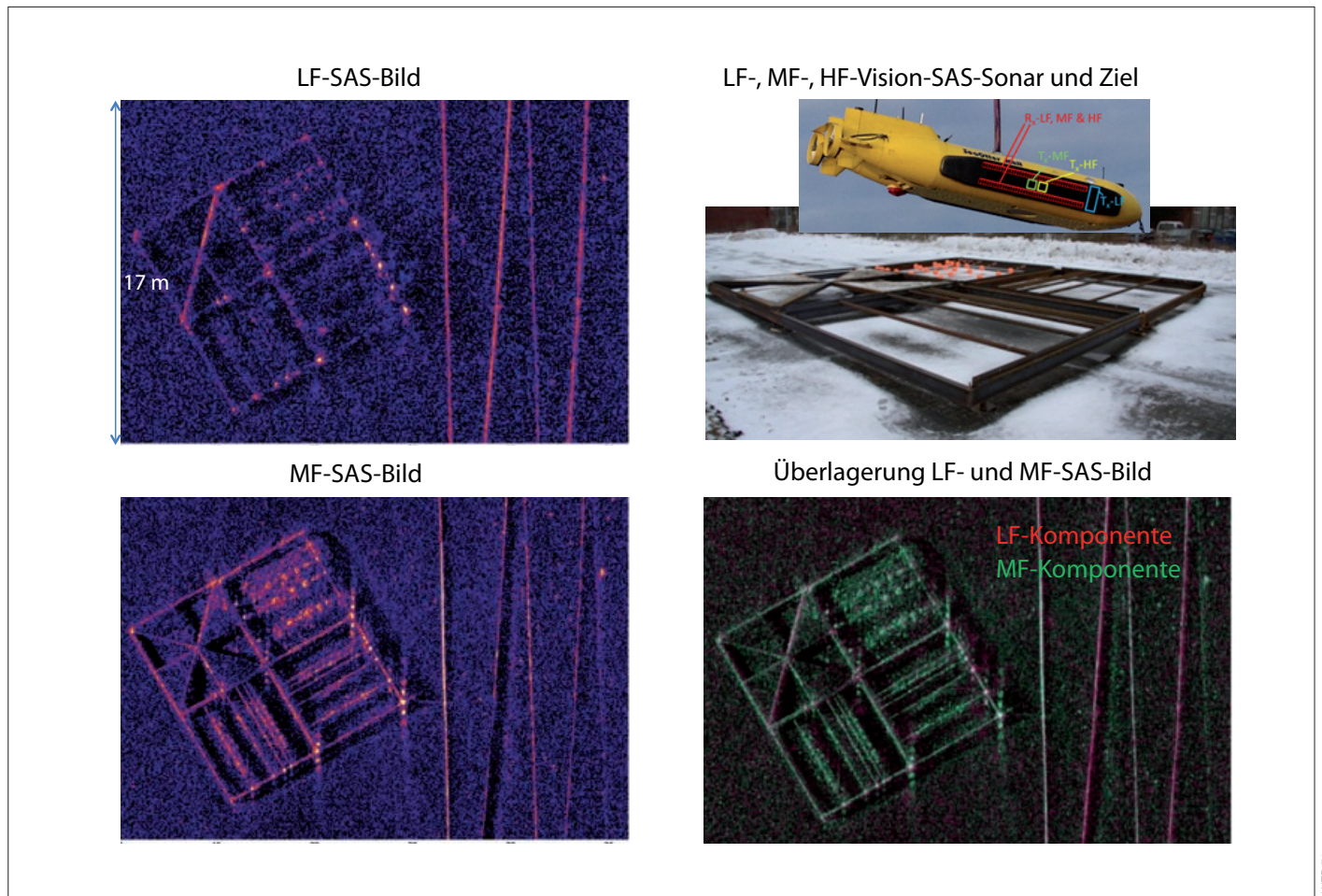
Hinzu kommt, dass diese Signalverarbeitung in dem strömenden Medium Wasser funktionieren muss. Wie jede Technologie hat daher auch diese Verarbeitung ihre Begrenzungen, die von den vorherrschenden Umweltbedingungen im Meer und den operationellen Missionsgegebenheiten des AUV abhängen. Diese sind:

- Die genaue Schätzung der Sonarbewegung längs der synthetischen Apertur muss möglich sein.
- Die Sensortrajektorie wird daher insbesondere datengetrieben mittels eines Kalmanfilters unter Verwendung der genauen Navigations- und aller verfügbaren Sonardaten geschätzt.
- Externe Bewegungsänderungen sollten vermieden werden.
 - Aufeinanderfolgende Lotperioden müssen ausreichend korreliert sein.
 - Das AUV muss sich daher ausreichend stabil durch die Wassersäule bewegen. Neben dem Fahrzeug bestimmen z. B. die Umwelt diese Größe: Signifikante Änderungen in der Höhe/Tiefe bzw. Kursrichtung des AUV bedingt durch z. B. den Durchgriff von Wellen an der Meeresoberfläche auf das Fahrzeug können die Stabilität unerwünscht beeinflussen und damit die SAS-Bildqualität verschlechtern.

- Ein Strömungsversatz des AUV, das heißt wenn ein Unterschied zwischen Kurs- und Steuerwinkel des AUV bedingt durch Querströmung auftritt, führt regelmäßig zu Problemen in der SAS-Verarbeitung und verschlechtert die Bildqualität.
- Mehrwege im Flachwasser müssen ausreichend unterdrückt werden.
 - Der Verlust der Signalphase z. B. durch das Auftreten von Mehrwegeeffekten im Flachwasser schränkt die Reichweite von SAS-Sonaren signifikant ein, da dann der SAS-Verarbeitung die Grundlage fehlt.
 - Vertikale Richtkeulen des Sonars: Mehrere Frequenzen und Beam-Steuerung können diese Mehrwegeeffekte verringern.
- Änderungen in der akustischen Weglänge bedingt durch Umwelteinflüsse (z. B. durch den Einfluss der Schallgeschwindigkeit oder interne Wellen) beeinflussen die Bildqualität ebenfalls bzw. können zu Artefakten führen.
- Ein ausreichendes Signal-Rausch-Verhältnis auch im Fernbereich (bis ca. 200 m) ist Voraussetzung für eine gute Bildqualität. Dieses hängt auch vom Meeresbodentyp am Aufnahmeort ab.

Die aktuellen Forschungsarbeiten der WTD 71 konzentrieren sich unter anderem darauf, die hier aufgeführten Umwelteinflüsse auf die SAS-Signalverarbeitung auszugleichen, um das Verfahren für

Abb. 4: Mit dem MF- und LF-Sender des Vision-1200-SAS-Systems mit einer Mittenfrequenz von 75 kHz bzw. 20 kHz aufgenommene SAS-Bilder (links) des Auflösungstestzieles (rechts oben) sowie die Überlagerung der beiden SAS-Bilder im Sinne eines Farbsonars (rechts unten)



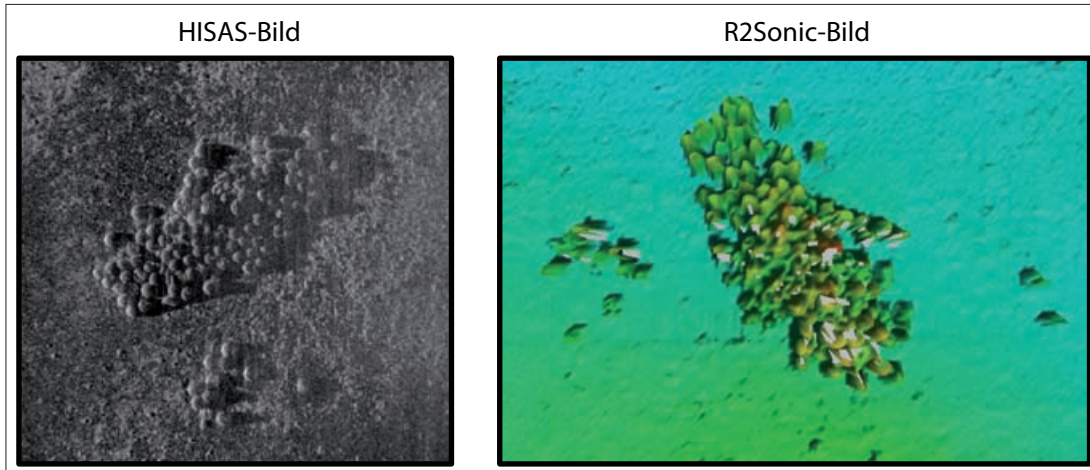


Abb. 5: Ein SAS- und ein Fächerecholotbild von ca. 70 Ankertauminen aus dem Zweiten Weltkrieg im Munitionsversenkungsgebiet Kolberger Heide. Die Systeme sind jeweils unter einem anderen Kurs über das Ziel gelaufen

die Nutzung robuster zu machen. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt bezieht sich darauf, die vom Ursprung her hochfrequente SAS-Verarbeitung in den Bereich der tieferen Frequenzen unterhalb von 30 kHz zu erweitern. Dafür wurde das bifrequente SAS-System Vision 1200 auf dem AUV Sea Otter MK II der WTD 71 mit den Mittenfrequenzen $f_{c, MF} = 75$ kHz und $f_{c, HF} = 150$ kHz um einen dritten Sender mit der Mittenfrequenz $f_{c, LF} = 20$ kHz für wissenschaftliche Untersuchungen ergänzt. Diese sehr viel niedrigere Frequenz ist in der Lage, ein Stück weit sowohl in Objekte als auch in den Meeresboden einzudringen. Eine Herausforderung bei der Anpassung der SAS-Verarbeitung für diese neuen tieffrequenten Daten bei der gegebenen Antennenkonfiguration ist z. B., dass die Öffnungswinkel der einzelnen Antennen für tiefere Frequenzen größer sind und damit die kohärente Integration bei der SAS-Verarbeitung über mehr Lotperioden erfolgen muss. Ein Beispiel für ein Zwischenergebnis ist in Abb. 4 das mittel- und tieffrequente SAS-Bild eines ebenfalls als Foto dargestellten Auflösungstestziels.

Das Auflösungstestziel erscheint in den beiden SAS-Einzelbildern für die LF- und MF-Frequenz sehr unterschiedlich. Grundsätzlich tritt mit der bestehenden Signalverarbeitung das Ziel in dem MF-SAS-Bild klarer hervor als in dem LF-SAS-Bild. Der Meeresboden ist dort ebenfalls kontrastreicher. Die mit Corner-Reflektoren des Zieles verbundenen Nebenkeulen sind zudem ausgeprägter. Allerdings zeigt das LF-SAS-Bild eine diagonale Linie des Ziels, die sich viel schwächer im MF-Bild abzeichnet. Zudem treten die neben dem Ziel liegenden Kabel sehr viel deutlicher im LF-SAS-Bild hervor. In der in Abb. 4 dargestellten Überlagerung der beiden SAS-Bilder im Sinne eines Farbsonars zeigt sich daher ein deutlicher Gewinn bei der Überlagerung dieser Bilder.

Weiterhin können moderne Seitensichtsonare mit SAS-Verarbeitung als interferometrische Systeme neben einem Rückstreubild des Meeresbodens zusätzlich auch das Höhenprofil des Meeresbodens vermessen. Alternativ dazu besitzen moderne AUVs neben dem Seitensichtsonar oft auch ein hochfrequentes Fächerecholot, mit dem das

Höhenprofil des Meeresbodens mit einem Bündel von Sonarstrahlen quer zur Fahrtrichtung abgetastet wird. Typischerweise tasten diese Systeme den Meeresboden mit 240 Sonarrichtkeulen verteilt über den Fächer mit einer Öffnung von 120° und einer Auflösung von $0,5^\circ$ quer zur Fahrtrichtung ab. Aufgrund der konstanten Winkelauflösung nimmt dabei die geometrische Auflösung auf dem Meeresboden mit zunehmender Flughöhe ab, während gleichzeitig die Suchstreifenbreite zunimmt.

Im Rahmen der Amtshilfe wurden die beschriebenen Systeme bei verschiedenen Messkampagnen eingesetzt. Beispielhaft zeigt Abb. 5 das Leistungsvermögen moderner AUV-Sensoren zur Detektion von auf dem Meeresboden aufliegender Altmunition. Gezeigt ist ein Munitionshaufen mit ca. 70 Ankertauminen aus dem Zweiten Weltkrieg im Munitionsversenkungsgebiet Kolberger Heide vor der Kieler Förde. Während in dem linken SAS-Bild aufgrund der hohen Auflösung von 2 bis 4 cm sich neben dem Haufen auch die einzelnen Minengefäße mit ihrer oval-runden Form klar abzeichnen, ist im rechten Bild des hochfrequenten Fächerecholots bei einer Flughöhe von ca. 10 m und einer Auflösung von ca. 25 cm zwar die Struktur des Haufens klar zu erkennen, aber die Form der einzelnen Minengefäße wird nicht mehr aufgelöst.

Tieffrequente, in den Meeresboden eindringende Sensorik

Für Altmunition ist die Detektion im Sediment besonders wichtig, da sie abhängig vom jeweiligen Meeresboden oft im Laufe der Zeit in diesen eingesunken ist.

Hochfrequente SAS-Seitensichtsonarsysteme und Fächerecholote bilden heute die Oberfläche des Meeresbodens zwar mit vielen Details ab, dringen aber nicht in diesen ein. Nur tiefe Sonarfrequenzen tun dies, wobei die Eindringtiefe mit sinkender Frequenz zunimmt.

Tieffrequente Fächerecholote für die Objektorung im Sediment sind derzeit noch Forschungsgegenstand. Weltweit existieren nur wenige experimentelle Systeme, wie z. B. das an der Florida Atlantic University entwickelte Buried Object Scanning Sonar (BOSS). Die praktische Beschränkung

in der physikalischen Antennengröße für diese tieffrequenten Systeme führt dazu, dass sie im Vergleich zu hochfrequenten Fächerecholoten nur eine sehr geringe Winkelauflösung besitzen. Hinzu tritt eine im Vergleich zur Wassersäule deutlich komplexere Schallausbreitung einschließlich Schallbrechung und -rückstreuung im Sediment, sodass eingesunkene Objekte mit tieffrequenten Sonaren nicht mit der gleichen Güte wie aufliegende Objekte mit hochfrequenten Sonaren abgebildet werden können.

Da die Detektionsleistung mit zunehmender Auflösung besser wird, kommen auch für diese tieffrequenten Fächerecholote SAS-Techniken zur Anwendung, bei der die Auflösung durch die Bewegung des AUV in Fahrtrichtung deutlich verbessert wird. Im Gegensatz zu Seitensichtsonaren führt hier die kohärente Überlagerung aufeinanderfolgender Lotungen zu einer synthetischen Verbreiterung der Antenne in Fahrtrichtung, sodass insgesamt eine vergrößerte zweidimensionale synthetische Antenne entsteht.

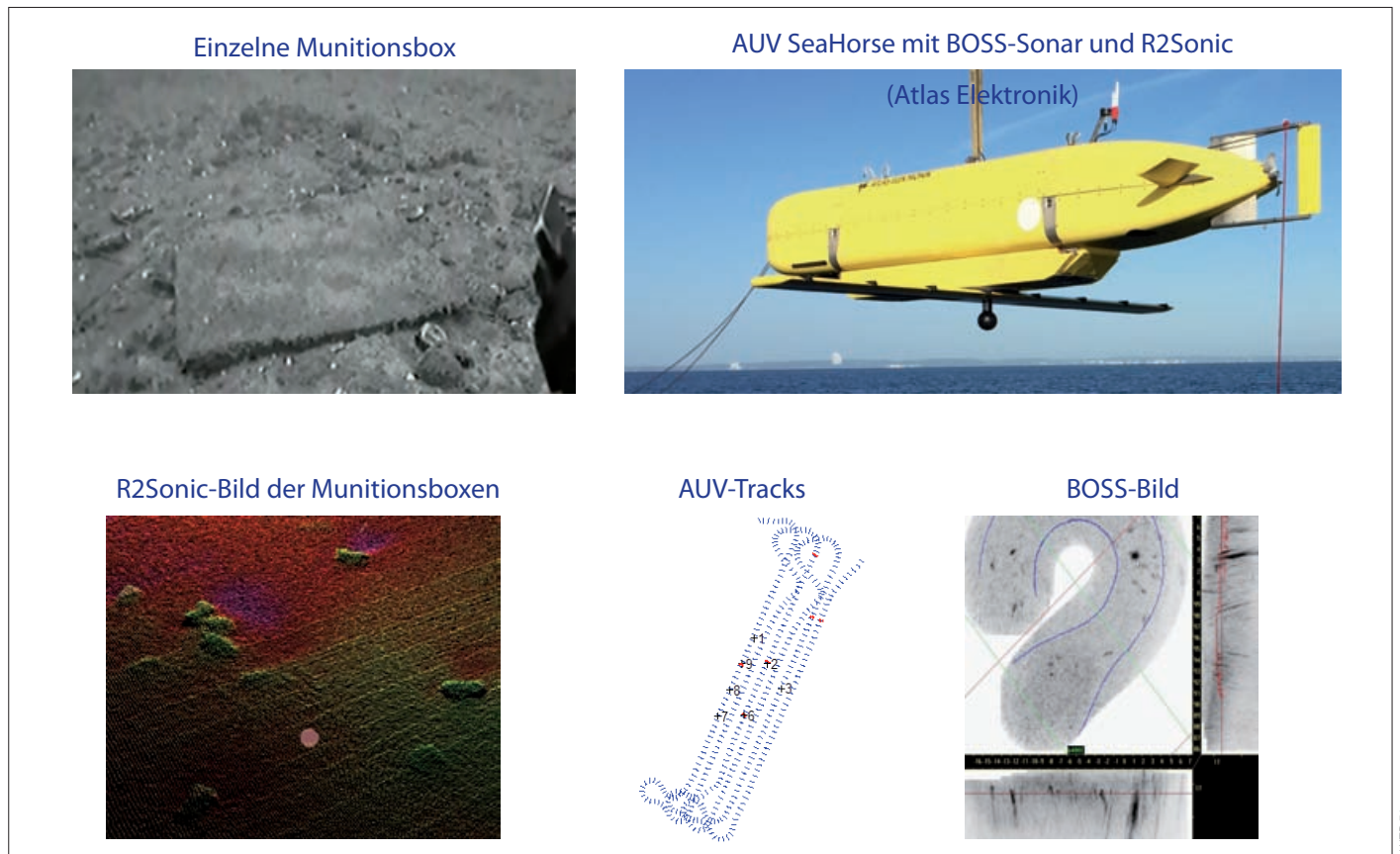
Ein wesentliches Problem dieser tieffrequenten Echolote resultiert aus der geringen Auflösung der Systeme verbunden mit dem Umstand, dass im Sediment neben den gesuchten künstlichen Objekten auch eine große Anzahl an möglichen natürlichen Streukörpern wie Steinen oder Muscheln existieren. Als Folge weisen diese Systeme eine hohe Falschalarmrate auf – das heißt eine Vielzahl an mit natürlichen Objekten verbundenen Fehldetektionen. Zudem kann das rückgestreute Signal in den Meeresboden eingesunkener Objekte durch die Rückstreuung an Grenzübergängen wie

beispielsweise dem Wasser-Sediment-Übergang maskiert werden. Daher werden in der Regel für diese Systeme effiziente Algorithmen zur Nachauswertung benötigt, um gute Detektionsergebnisse erzielen zu können.

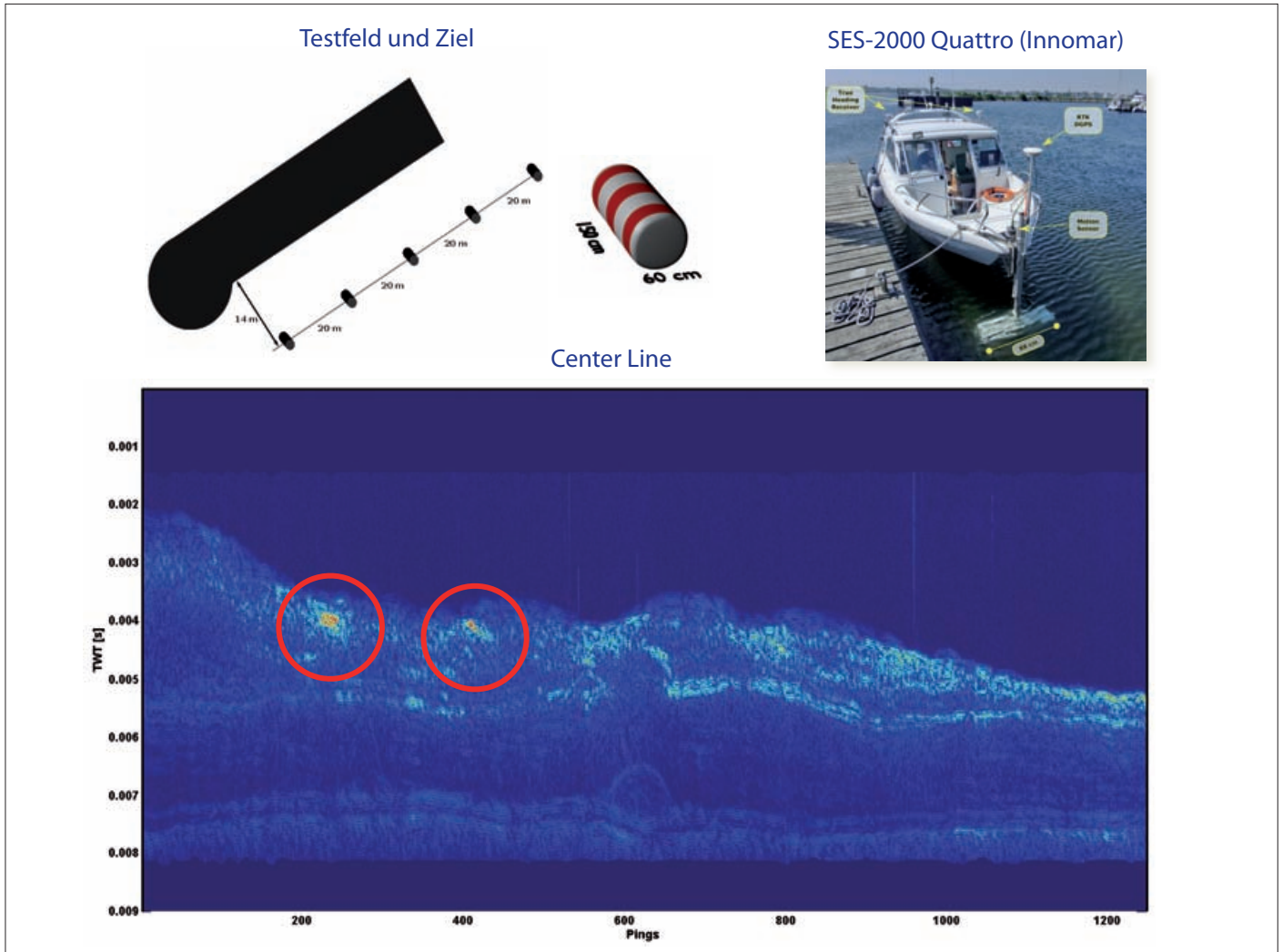
Abb. 6 zeigt beispielhaft ein tieffrequentes BOSS-Fächerecholot der Firma EdgeTech, montiert unter dem DeepDiver-AUV SeaHorse der Firma Atlas Elektronik, bei einem Einsatz in der Lübecker Bucht (oben rechts). Typische »Flughöhen« des AUV über dem Meeresboden betragen dabei 2 bis 4 m. Zusätzlich ist das AUV SeaHorse unter anderem mit einem hochfrequenten R2Sonic-Fächerecholot ausgestattet. Mit beiden Systemen wurde ein Munitionsversenkungsgebiet mit einzelnen, teilversandeten Munitionsboxen (gefüllt mit Artilleriemunition) sowie Haufen der gleichen Munitionsart auf dem Meeresboden vermessen. Eine einzelne in den Meeresboden eingesunkene Munitionskiste ist oben links zum Vergleich im Foto wiedergegeben. Darunter sind beispielhaft Detektionsergebnisse für die beiden aufgeführten Sonare dargestellt.

Eine begrenzte Alternative zu tieffrequenten Fächerecholoten stellen parametrische Sonare dar, die eine Sonderform des normalen Echolotes sind. Diese Systeme nutzen die nichtlineare Übertragungseigenschaft des Wassers bei hohen Schallpegeln aus, bei der durch Mischung und Überlagerung von zwei hochfrequenten primären Sonarsignalen von z. B. 100 kHz und 100 bis 120 kHz ein tieffrequentes Sekundärsignal zwischen 0 und 20 kHz (gemäß der Westervelt-Lighthill-Gleichung) entsteht. Dabei wird die Frequenz

Abb. 6: Das DeepDiver-AUV SeaHorse im Einsatz in der Lübecker Bucht



©WTD/71



© WTD 71

des Sekundärsignales durch die Frequenzdifferenz der Primärsignale bestimmt.

Vorteile dieser parametrischen Technik liegen darin, dass schmale Richtkeulen um 1° oder 2° auch sehr tieffrequent mit kleinen Sendern realisiert werden können, da deren Breite durch die hochfrequente Primärfrequenz bestimmt wird. Zudem besitzen diese Systeme nahezu keine Nebenkeulen und sind breitbandig. Wesentliche Nachteile liegen in dem Umstand, dass der Schall sich mehrere Meter durch die Wassersäule ausbreiten muss, damit der parametrische Effekt voll wirksam wird, diese Systeme oft nur eine Richtkeule besitzen und dass bei einem hohen Leistungsbedarf der Primärsignale die Effizienz für das Sekundärsignal sehr gering ist.

Mit einem parametrischen Standardsonar lässt sich der Schichtaufbau des Meeresbodens als zweidimensionaler Tiefen-Entfernungsschnitt vermessen. Für die Objektsuche im Sediment werden allerdings dreidimensionale Daten benötigt. Diese kann man dadurch erhalten, dass eine entsprechende Anzahl an parallelen Tiefen-Entfernungsschnitten mit einem einzelnen parametrischen Wandler vermessen wird. Die Daten werden dann in der Nachverarbeitung in ein dreidimensionales Gitter übertragen. Die Flächensuchrate lässt sich steigern, wenn mehrere parametrische Wandler parallel nebeneinander während eines Überlaufs

betrieben werden, um mehrere Tiefen-Entfernungsschnitte parallel vermessen zu können.

Ein solches parametrisches System – das Innomar SES-2000 Quattro – wurde bereits erfolgreich in der Offshore-Archäologie eingesetzt. Ein Beispiel aus der Suche nach eingesunkenen Objekten zeigt Abb. 7. Aufgrund des Energiebedarfs erfolgten die Messungen mit Hilfe eines Oberflächenbootes der Firma Innomar in der Eckernförder Bucht. Ziele waren eine Anzahl von zylindrischen Objekten in der Nähe einer Pier, wobei der Meeresboden schwierig war und stark seewärts abfiel. Dargestellt ist das schematische Testfeld, ein Tiefen-Entfernungsschnitt über die fünf im Meeresboden befindlichen Objekte, von denen die zwei linken Objekte sich aufgrund der geometrischen Gegebenheiten für diesen Schnitt am deutlichsten abzeichnen.

Magnetik

Die kommerzielle Sondierung von Meeresbodenbereichen basiert heute regelmäßig – genauso wie an Land – auf der magnetischen Vermessung eines Seegebietes.

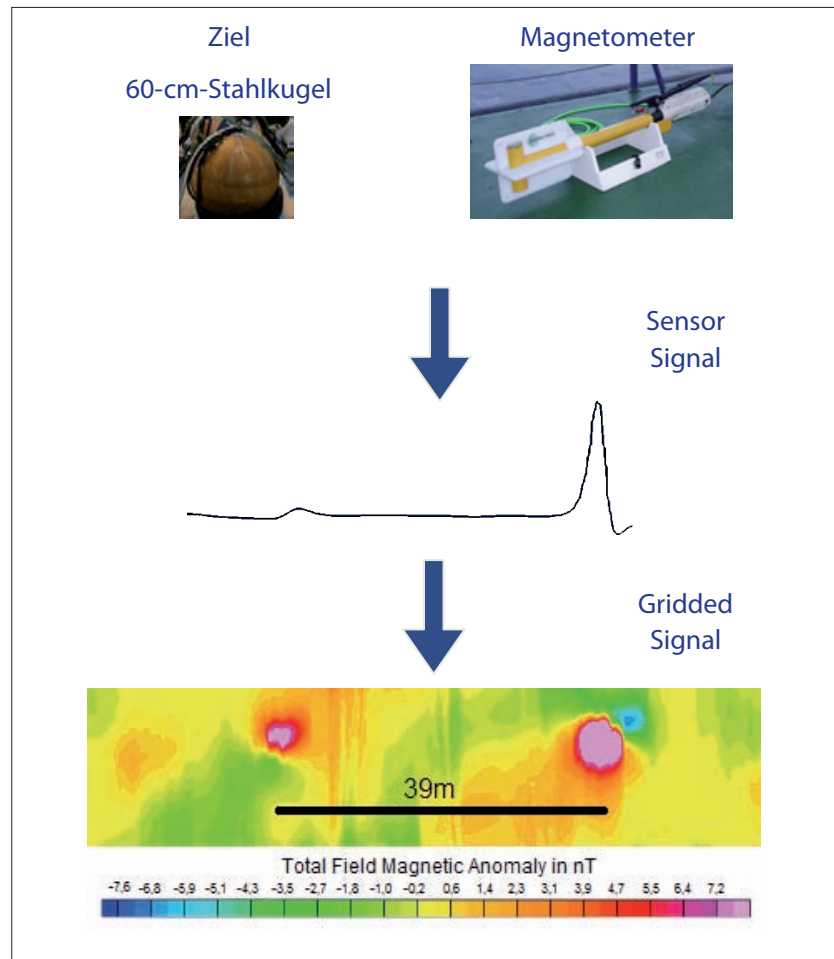
Grundsätzlich besitzen alle ferromagnetischen Objekte eine vom Erdmagnetfeld induzierte sowie eine rein vom Objekt abhängende sehr variable permanente Magnetisierung. Beides sind vektorielle Größen, die sich addieren, wobei im Allgemei-

Abb. 7: Ein Tiefen-Entfernungsschnitt, aufgenommen mit dem parametrischen Innomar-Sonar SES-2000 Quattro in der Eckernförder Bucht über einem Testfeld mit fünf versenkten Objekten

nen die permanente Komponente stärker ausgeprägt ist. Damit können durch ferromagnetische Körper verursachte Änderungen im Erdmagnetfeld als Anomalien mittels eines einzelnen oder mehrerer parallel angeordneter hochempfindlicher Totalfeldmagnetometer detektiert werden. Da das totale magnetische Feld eines ferromagnetischen Objektes mit etwa r^3 abfällt, reduziert sich die detektierbare magnetische Anomalie grob um einen Faktor 8 bei einer Verdopplung des Abstandes. Für eine nicht explodierte 250-lbs-Bombe (ca. 110 kg) bedeutet dies, dass eine totale magnetische Anomalie von z. B. 800 nT/m in 1 m Abstand auf 100 nT/m in 2 m Abstand bzw. 12 nT/m in 4 m Abstand abfällt. Aufgrund dieser geringen Reichweite werden Totalfeldmagnetometer in der Nähe des Meeresbodens in einem rasenmäherähnlichen Muster mit einem Bahnabstand von einem bis zu wenigen Metern zwischen den einzelnen Bahnen über das zu untersuchende Gebiet mittels Schiff geschleppt. Um die einzelnen Messungen längs der Bahnen zu einer zweidimensionalen magnetischen Karte zusammenfügen zu können, benötigen diese Systeme eine hochgenaue Unterwasser-navigation bezogen auf den Sensor unter Wasser.

Totalfeldmagnetometer detektieren magnetische Anomalien, die durch ferromagnetische Objekte verursacht sind. Dazu zählt die aus Eisen und Stahl gefertigte (Alt-)Munition, aber auch viele weitere Objekte aus diesem Material (z. B. Anker), die im Laufe der Zeit auf den Meeresboden gelangten.

Abb. 8: Detektion der magnetischen Anomalie zweier im Sediment eingesunkener ferromagnetischer Stahlkugeln mit einem Durchmesser von 60 cm mit dem Cäsium-Totalfeldmagnetometer G882 der Firma Geometrics



Weiterhin gibt es einerseits auch Munitionsarten, die aus Aluminium oder anderen nicht-ferromagnetischen Materialien gefertigt sind, und andererseits umgekehrt auch Steine, die Eisen enthalten können. Bezogen auf die Sedimenteigenschaften des Meeresbodens, wie z. B. den Bodentyp, werden die Messungen mit Totalfeldmagnetometern insgesamt relativ selten durch diesen beeinflusst.

Anders verhält es sich mit Fahrzeugen. Sind Totalfeldmagnetometer auf oder in einem AUV oder ferngesteuerten Unterwasserroboter eingebaut, so besteht regelmäßig ein signifikanter Einfluss dieser Systeme auf die magnetische Messung, da jeder Motor mit einem Magnetfeld verbunden ist. Daher sind solche Systeme – im Gegensatz zu geschleppten magnetischen Messsystemen – noch im Forschungsstadium, um eine vergleichbare Empfindlichkeit wie bei geschleppten Systemen zu realisieren.

Neben der magnetischen Gesamtanomalie können auch die einzelnen Vektorkomponenten mit einem sogenannten Fluxgate-Magnetometer bestimmt werden. Die Leistungsfähigkeit beider Systeme wird derzeit als gleichwertig betrachtet.

Aufgrund der Vielzahl an Einflussmöglichkeiten führt eine magnetische Vermessung eines Seegebietes zu einer Vielzahl an Anomalien, sodass sich nach der Sondierung nach Altmunition regelmäßig die Frage nach der Bewertung der detektierten Anomalien stellt. Dafür liefern gängige Ansätze aus dem Landbereich signalgestützte Abschätzungen von Klassifikationsparametern, wie z. B. das magnetische Moment oder Objektdurchmesser und -volumen. Bei der praktischen Anwendung stellt sich dann in der Regel heraus, dass insbesondere die letzten beiden geschätzten Parameter mit erheblichen Unsicherheiten verbunden sind, sodass dieses ein weiteres Feld für die rechnergestützte Auswertung darstellt.

Beispielhaft ist im Folgenden das geschleppte Cäsium-Totalfeldmagnetometer G882 der Firma Geometrics vorgestellt, welches in der Lübecker Bucht eingesetzt wurde. Abb. 8 zeigt das System, ein Bild der im Sediment eingesunkenen Stahlkugeln mit einem Durchmesser von 60 cm sowie die damit verbundene magnetische Detektion im einzelnen Überlauf und in einer flächigen magnetischen Anomaliekarte.

Chemische Sensoren

Für die Verifizierung von Altmunitionsfunden könnten sich zukünftig chemische Sensoren anbieten, die gegenwärtig für den Einsatz auf AUVs adaptiert werden. In der letzten *HN*-Ausgabe wurde bereits das AUV SeaCat mit Raman-Spektrometerkopf vorgestellt, der die Untersuchung des Meerwassers oder des Sediments auf chemische Bestandteile von Schadstoffen in situ vorantreibt (Stavenhagen 2015). Erste Messungen mit dem System wurden im Munitionsversenkungsgebiet Kolberger Heide durchgeführt.

Einen alternativen Ansatz stellt der vom Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie entwi-

ckelte elektrochemische Sensor dar, der ebenfalls als Sensorkopf auf dem AUV SeaCat in ersten Messungen in der Eckernförder Bucht genutzt wurde. Dabei konnten geringe Mengen an TNT bzw. PETN über wenige Meter detektiert werden.

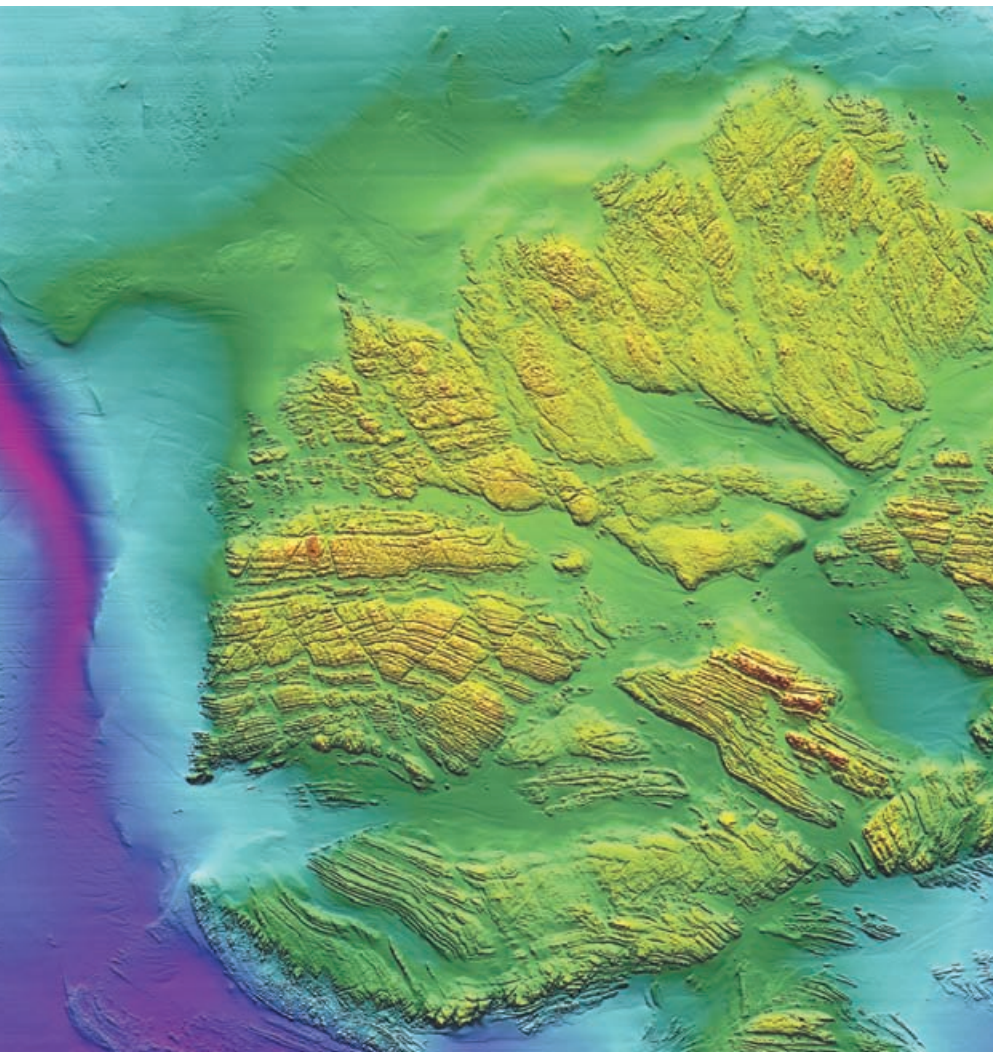
Beide Technologien könnten zukünftig im Bereich der Altmunitionssuche von Interesse sein, da diese Munition zunehmend verrottet und damit Inhaltsstoffe freisetzt. Zu beachten ist allerdings, dass freigesetzte Inhaltsstoffe dem Strömungsfeld im Meer folgen, sodass die gewählte Messkonfiguration die herrschenden Umweltbedingungen mit einbeziehen muss.

Ausblick

Um Altmunition im Meer zeitnah unter Einbeziehung wirtschaftlicher Aspekte entsorgen zu können, muss diese mittels Sonar, magnetischem Sensor oder durch weitere Verfahren räumlich detektiert und nach Möglichkeit klassifiziert werden. Dafür sind neben den geeigneten Sensoren intelligente Auswertestrategien zur automatischen Lokalisierung, Klassifikation und ggf. Identifikation von großer Bedeutung. Bedingt durch die große räumliche Ausdehnung der vorhandenen Altmunition werden effiziente Systeme benötigt, die aus physikalischen Gründen und aus Kostengründen bevorzugt auf einem tiefenvariablen autonomen Unterwasserfahrzeug als Sensorträger eingesetzt werden sollten.

Die aktuell untersuchten bzw. eingesetzten und vorgestellten Sensoren für diese Aufgaben weisen durchgängig Stärken und Schwächen bzw. Grenzen der Einsetzbarkeit auf. Daher ist derzeit nach einer Risikobewertung für ein auf Altmunition zu untersuchendes Gebiet eine sorgfältige Planung der durchzuführenden Messungen einschließlich der Auswahl des am besten dafür geeigneten und verfügbaren Sensors erforderlich. Wichtig ist dabei die Einbeziehung der Eigenschaften des Meeresbodens im Suchgebiet sowie der vorherrschenden Umweltbedingungen. Welche Objekte mit welchen Eigenschaften, in welcher Größe sowie an welchem Ort – auf oder im Meeresboden – gesucht werden müssen, stellt eine weitere wichtige Rahmenbedingung dar. Nach dieser Planung kann dann abgeschätzt werden, in welchem Umfang vorhandene Altmunition gemäß der vorgegebenen Zielsetzung detektiert werden kann.

Zukünftig werden sich die derzeit bestehenden Detektionsgrenzen nur verschieben lassen, wenn einerseits zunehmend eine intelligente, rechnergestützte Auswertung für die verschiedenen Sensoren zur Verfügung steht und andererseits aufgrund der unterschiedlichen Stärken und Schwächen der zur Verfügung stehenden Systeme die Ergebnisse mehrerer Sensoren rechnergestützt kombiniert werden können, die nach Möglichkeit zeitgleich AUV-gestützt ein Gebiet vermessen. [⚓](#)



40+

YEARS OF HYDROGRAPHIC EXPERIENCE

Fugro's hydrographic and geophysical surveys inform energy, construction and mining projects around the world.

Our high resolution, large area multibeam surveys - facilitated by Fugro's precise positioning services - deliver IHO compliance, whilst our desktop studies and detailed surveys of cable routes, pipelay and subsea infrastructure, enhance the safety and efficiency of your project.

Fugro OSAE GmbH
+49 4212 239150
info@fosae.de
www.fugro.com
www.fosae.de