CATRA - Trassenfolgende seismoakustische Seekabeldetektion

Schlussbericht im Teilprojekt HF-3D-Marin

Entwicklung einer hochfrequenten mehrkanaligen seismischen Vermessungsanlage für marine 3D Anwendung

I Kurze Darstellung zu

1 Aufgabenstellung

Das Gesamtziel des Verbundvorhabens CATRA mit den Partnern emma Technologies (Verbundleitung), TEEC und GEOMAR, war die Entwicklung eines 3D vermessenden akustischen Geräteträgers zur Trassen folgenden Seekabelvermessung. Erstaunlicherweise ist festzustellen, dass bisher kein Messsystem entwickelt wurde, mit dem eine ökonomische Kontrolle der Energieseekabel im laufenden Betrieb möglich ist. Die Schwierigkeit der Vermessung besteht darin, ein Kabel mit kleinem Durchmesser von nur etwa 7,5 cm bis 25 cm in wenigen Metern Tiefe unter dem Meeresboden eindeutig abzubilden. Die notwendige Auflösung erfordert Signalfrequenzen von 8 kHz. Der Geräteträger soll dabei in getauchtem Zustand geschleppt werden, um eine größere Unabhängigkeit vom Wellengang zu erreichen und damit das Wetterfenster der Vermessungsarbeit zu erweitern. Die seitliche Auslage (Flügel) von Signalempfängern soll dabei eine dreidimensionale Abbildung des Untergrundes erlauben und sicherstellen, das Abweichung von der Kabellinie und seitliches verdriften des Geräteträgers nicht zu einer Lücke in der Trassendokumentation führen.

In dem Verbundvorhaben hat GEOMAR die Elektrifizierung und Ausstattung des Geräteträgers mit der nötigen Sensorik übernommen. Dies umfasst die Anbindung der Stromversorgung, Übermittlung der Triggersignale und Datenübertragung zwischen dem Geräteträger und dem schleppenden Schiff, den Betrieb der Signalquelle, die Digitalisierung und Bündelung der Signalempfänger, sowie die Integration der verschiedenen Navigationshilfen zur Positions- und Lagebestimmung des Geräteträgers.

Neben dieser technischen Ausrüstung gehört die digitale Datenerfassung, Aufbereitung der Navigation und Verarbeitung seismischen Signale zum Aufgabenbereich des GEOMAR. Dies beinhaltet die Erstellung von Arbeitsabläufen und Parametrisierung der Komponenten bis zur Erstellung der Positionsdateien und Aufbereitung der seismischen Daten im Standardformat SEG-Y.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Grundlegende Voraussetzung zur Durchführung des Vorhabens ist die Kooperation der drei Verbundpartner mit ihren unterschiedlichen Expertisen und Kapazitäten. Ein besonderer Vorteil war dabei durch die räumliche Nähe der Standorte von GEOMAR und emma Technologies gegeben, die unkomplizierte und kurzfristige Arbeitsbesuche ermöglichte.

Für die geforderte 20% Eigenbeteiligung standen außerhalb des GEOMAR Etat keine Finanzmittel zur Verfügung. Die Eigenbeteiligung konnte daher nur durch die in das Projekt umgesetzten Personen abgebildet werden. Hierfür wurde durch die Forschungseinheit Marine Geodynamik 50% einer Wissenschaftlerstelle und 50% einer Ingenieursstelle bereitgestellt.

Der Projektbeginn stand noch unter dem Einfluss des zweiten Corona Lockdown und dessen Nachwirkungen. Die Mehrzahl der mit persönlicher Anwesenheit geplanten Besprechungen wurde in Videokonferenzen umgesetzt.

Insbesondere für die Integration der Bewegungs- und Navigationssensoren waren wiederholte Testfahrten notwendig. Hierfür war am GEOMAR die Forschungsbarkasse POLARFUCHS geplant. Ab Mai 2022 stand die FB POLARFUCHS jedoch nicht mehr zur Verfügung. Die alternative Nutzung der wenig ausgelasteten und privat geführten Forschungsbarkasse SAGITTA hat sich wegen deren Einschränkungen im Seegangsverhalten als ungeeignet erwiesen. Der Zugriff auf den Forschungskutter LITTORINA des GEOMAR war wegen der hohen Nachfrage mit längeren Wartezeiten verbunden. Anfragen an private Vermessungsschiffe waren nicht erfolgreich, da diese weiter im Osten stationiert sind und nach Auftragslage teilweise sehr kurzfristig verlegt wurden.

Über die Kartierung von Seekabeln hinaus wird eine weitere wissenschaftliche

Einsatzmöglichkeit im Bereich der flächigen Kartierung archäologischer Objekte und eingespülter Munitionsaltlasten, die nicht durch Meeresbodenkartierung zu erkennen sind, erwartet. Die kleinskalige Vermessung meeresbodennaher Fluidsysteme und Bruchzonen bietet eine weitere mögliche wissenschaftliche Verwertung.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Zum Entwurf der Projektskizze wurde mit Mitteln des „GEOMAR Innovationsfonds Industriekooperation“ vorab eine Modellstudie durchgeführt. In der Studie wurde ein für die Ostsee typisches Untergrundmodell mit einem Seekabel in 2 m Vergrabungstiefe entwickelt. Synthetische Datenbeispiele haben die seismische Antwort bei unterschiedlichen Signalfrequenzen und Geometrien für Signalquelle und Empfänger abgebildet und die Rahmenbedingungen für ein Kartierungssystem festgelegt. In einer Marktstudie hat sich gezeigt, dass es keinen Anbieter für ein akustisches Vermessungssystem mit den geforderten Signalfrequenzen von 8 kHz und einer, für die 3D Vermessung notwendigen, mehrkanaligen Empfängerarchitektur gibt. So wurden aus diesen Rahmenbedingungen Patente zum Sensorarray, zu einer Plattformgestaltung und zum Verfahren entwickelt und eingereicht. In Gesprächen mit den deutschen Betreibern von Seekabeln 50Hz (Ostsee) und TenneT (Nordsee) wurden Bedarfe zur Kabeldetektion und Bedingungen der Kabelverlegung diskutiert. Beteiligungsinteressen an einem Projekt konnten nicht erreicht werden.

Zum Start des Projektes wurden im Projektverbund noch einmal die Anforderungen an die seismische Signalerfassung unter Berücksichtigung der geplanten Softwareentwicklung für die Datenverarbeitung und Auswertung betrachtet. Die Signalerfassung sollte mit 14 cm Hydrophonabstand (7 cm Mittelpunkte am Meeresboden) erfolgen. Für erste Tests mit einer zentralen Signalquelle wurde ein kleiner Geräteträger SIG-1 (Spannweite 2 m) vorgesehen. Der spätere größere Flügel trägt zwei Signalquellen in den Auslegern und ermöglicht günstigere Messwinkel sowie eine zweiseitige Beleuchtung des Untergrundes im Flip-Flop Verfahren. Mit Blick auf die für eine Vermessung typischer Weise eingesetzten kleineren und mittelgroßen Schiffe wurde die Entscheidung für eine Umsetzung über einen einzelnen Schleppkörper (Flügel) getroffen. Eine Aufteilung in zwei parallel geschleppte Flügel wurde mit Blick auf eine komplexe Schleppkonstruktion mit Scherbrettern zunächst verworfen. Damit konnte auch die Navigation, Signalerzeugung und Signalerfassung einfacher projektiert werden.

Eine aktualisierte Marktrecherche, Vorverhandlungen und Ausschreibung der Systemkomponenten im Aufgabenbereich des GEOMAR konnte erhebliche Verzögerungen von 3 bis 6 Monaten in den Lieferzeiten nicht verhindern. Erst nach erfolgten Zuschlägen in den Ausschreibungen konnte anhand der technischen Unterlagen mit dem Entwurf von Leitungsplänen begonnen und die notwendigen Schaltungskästen konfiguriert werden. Erste Schlepptests des SIG-1 ohne elektronische Ausrüstung wurden mit Partner emma Technologies auf der Forschungsbarkasse POLARFUCHS planmäßig durchgeführt. Erste Funktionstests nach dem Einbau der elektronischen Komponenten fanden stationär an der GEOMAR Pier statt. Die weitere Parametrisierung und Test der Navigationskomponenten erforderte Schlepptests, für die Einsatztage des FK LITTORINA beantragt wurden. Durch die hohe Nachfrage entstanden nicht geplante Wartezeiten von bis zu acht Wochen.

Die Abstimmung von Signalquelle und Registrierung konnte schnell abgeschlossen werden. Das Zusammenspiel der Navigationskomponenten erforderte wiederholte Testfahrten und mehrfache Nachbesserungen. Insbesondere die Stabilisierung des Inertialsystems, welches die räumliche Orientierung und Bewegung in getauchtem Zustand protokollieren soll, gestaltet sich schwierig. Fehler einzelner Systemkomponenten können nur durch Teilabschaltungen identifiziert werden, erfordern aber immer den bewegten Einsatz des Systems, so dass Modifikationen erst bei der nächsten Testfahrt überprüft werden können. Im Laufe der Testfahrten wurde ein Fluxgate Kompass und ein USBL-System nachgerüstet. Durch ein Versetzen von Auftriebskörpern konnte das Rollen des Geräteträgers bei seitlicher Anströmung verringert und fehlerhafte Messwerte des Doppler-Log (DVL) verhindert werden.

Zur Kompensation von Zeitverlusten während des Projektablaufes und der unregelmäßigen Testfahrten wurde eine kostenneutrale Verlängerung beantragt. In deren Verlauf konnten weitere Testfahrten absolviert werden. Eine neue Strukturierung in der Kabelführung und ein zusätzliches Schaltgehäuse für die Navigationsdatenleitungen wurden ergänzt.

Eine weitere Testfahrt nach Projektende hat eine Registrierung mit stabilen Navigationssystemen ermöglicht. Es verbleibt die Notwendigkeit eine Drift des

Inertialsystems mit Informationen der USBL-Anlage nachträglich zu korrigieren. Hierfür wurde ein neuer Arbeitsablauf entwickelt, so dass die seismischen Daten in ihrer 3D Konfiguration aufbereitet werden können. Eine abschließende Visualisierung in 3D konnte bis zum Berichtstermin nicht mehr erarbeitet werden.

4 wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere

Die Überwachung der Tiefenlage von Seekabeln wird von den Genehmigungsbehörden für die im Meeresboden vergrabenen Abschnitte in wiederholten Zeitabständen verlangt. Hierfür können vier Methoden angewendet werden, das Impuls-Neutronen Verfahren, Magnetfeldvermessungen, akustische Vermessungen oder seismische 2D Standardvermessung, die aus verschiedenen Gründen als nicht ausreichend effizient eingeschätzt werden.

Bisher entwickelte 3D Systeme werden an der Wasseroberfläche geschleppt (Gutowski et al., 2008; Vardy et al., 2008) oder an einem Überwasserschiff montiert (Dinn, 2012). Diese Systeme sind nur für Wassertiefen von wenigen 10er Meter einsetzbar und können schon bei 30 cm Wellenhöhe nicht mehr genutzt werden (Dinn, 2012). Getauchte Systeme sind an den langsamen Profilfortschritt eines ROV gebunden oder werden durch begrenzte Energieressourcen eines AUV eingeschränkt (Dinn, 2012). Autonome Fahrzeuge benötigen darüber hinaus eine automatische Objekterkennung, um Abweichungen der Kabeltrasse folgen zu können (Nikolovska, 2015; Stavenhagen, 2016), die für eingegrabene Kabel bisher am Markt nicht verfügbar ist. Daher erfolgt klassischer Weise eine Überprüfung des Kabelverlaufs mit einstrahligen Sedimentloten und einer engabständig wiederholten Profilierung quer zur Trassenrichtung.

Für die Umsetzung des Projektes wurden keine Schutzrechte Dritter in Anspruch genommen.

Fachliteratur:

Deimling, J. S. v., Held, P., Feldens, P., and Wilken, D., 2016, Effects of using inclined parametric echosounding on sub-bottom acoustic imaging and advances in buried object detection: Geo Mar. Lett., v. 36, no. 2, p. 113 - 119.

Dinn, G., Field Experience with a New Sub-Bottom Investigation Tool2012, p. 1 - 9.

Gutowski, M., Bull, J. M., Dix, J. K., Henstock, T. J., Hogarth, P., Hiller, T., Leighton, T. G., and White, P. R., 2008, 3D high-resolution acoustic imaging of the sub-seabed, v. 69, no. 3, p. 262 - 271.

Köhli, M., and Schmoldt, J.-P., 2021, Potential von Impulse-Neutron-Neutron-Logging zur Kampfmitteldetektion: altlasten spektrum, v. Dezember 2021, p. 189-212.

Nikolovska, A., AUV based flushed and buried object detection2015, p. 2106 - 2110.

Schock, S. G., 2008, Synthetic aperture 3D buried object imaging: Underwater Technology, v. 27, no. 4, p. 185 - 193.

Stavenhagen, A., 2016, KaPiTaS Kabel- und Pipeline-Inspektion in der Tiefsee mit autonomen Systemen.

Vardy, M. E., Dix, J. K., Henstock, T. J., Bull, J. M., and Gutowski, M., 2008, Decimeter-resolution 3D seismic volume in shallow water: A case study in small-object detection: Geophysics, v. 73, no. 2, p. B33 - B40.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

In Deutschland betreiben die Firmen 50Hz (Ostsee) und TenneT (Nordsee) Seekabel. Bei beiden Unternehmen wurde das Projekt vorgestellt und mögliche Kooperationen diskutiert. Zwar wurden Informationen zu Seekabeln und deren Verlegung gegeben, weitere Beteiligungen an dem Projekt konnten aber nicht vereinbart werden. Eine von Fa. TenneT in Aussicht gestellte Überlassung eines Restkabels für Testzwecke in der Ostsee konnte trotz vorbereiteter Abholung nicht umgesetzt werden.

Für die mit dem Projekt entwickelten Innovationen wurde eine Möglichkeit des gewerblichen Schutzes gesucht. In der Entwicklungsphase der Projektskizze und im Verlauf der Projektdurchführung bestand durch den am GEOMAR geführten Innovationsfond die Möglichkeit mit der PVA Schleswig-Holstein in Kiel einen Patentantrag zu entwickeln. Im Zuge der Formulierung des Schutzanspruches wurden hieraus drei Patentanträge formuliert und zur Prüfung eingereicht. Die Patentansprüche sind veröffentlicht worden und Schutzrechte für die wichtigsten Anrainerstaaten von Nord- und Ostsee mit Seekabel

Verbindungen beantragt worden.

Im Laufe der Projektdurchführung wurde die Zusammenarbeit des GEOMAR mit der PVA beendet. Im Zuge der Neuaufstellung der Abteilung Technologie-Transfer am GEOMAR wurde die TUTECH Innovation GmbH in Hamburg mit der Patentbearbeitung und Verwertung beauftragt. Die TUTECH hat die Betreuung der drei Patentverfahren übernommen. Zusätzlich wurde ein Exposé erstellt, mit dem TUTECH mögliche Interessenten ansprechen wird um eine Vermarktung und Weiterentwicklung zu erreichen.

II Eingehende Darstellung

1 der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die Projektmittel (Zuwendung und Eigenleistung) erstreckten sich im Wesentlichen zu zwei Dritteln auf Materialkosten und zu einem Drittel auf Personalkosten. Die Personalkosten wurden eingesetzt, um jeweils eine 50% Besetzung eines Wissenschaftlers und eines Ingenieurs im Projekt zu sichern. Auf der wissenschaftlichen Position wurde die Systemplanung, Laufpläne zur Datenverarbeitung, Integration von Metadaten und Signaldaten, Signalauswertung, Projektsteuerung und Leitung der Testfahrten umgesetzt., Der Ingenieur hat die technische Planung (Schaltpläne, Verkabelung, Datenübermittlung und -erfassung, etc.) übernommen sowie die benötigten Unterwassergehäuse und Verkabelungen entworfen, angefertigt und montiert. Zusätzlich wurden weitere Ingenieure und Wissenschaftler der Forschungseinheit Marine Geodynamik je nach Bedarf und Expertise eingebunden.

Mit Projektbeginn wurden die Arbeiten zur technischen Vorbereitung aufgenommen. Zwischen GEOMAR und emma Technologies wurde ein Abgleich der CAD Software vorgenommen, um später Konstruktionsunterlagen einfach austauschen zu können. In mehreren Planungsgesprächen zwischen Wissenschaftlern, Entwicklern und Ingenieuren der beiden Partner wurden Konstruktionsentwürfe mit den Anforderungen der Vermessungssysteme besprochen und weiterentwickelt. Parallel hat Partner TEEC ein verbessertes Untergrundmodell entwickelt und neue FD Modellierungen zu verschiedenen Aufnahmegeometrien durchgeführt. In gemeinsamen Videokonferenzen der Partner wurden zwischen den beteiligten Wissenschaftlern, Entwicklern und Ingenieuren die Rahmenbedingungen (Signalfrequenzen, Montagepunkte und Montageabstände) für Signalquelle, Signalempfänger und die technische Konstruktion des Geräteträgers ermittelt. Das daraus entstandene Leistungsverzeichnis (Milestone 1.1) für das seismische System stellte die Grundlage zu Bietergesprächen für die elektronische Ausrüstung der Geräteplattform dar.

In Bietergesprächen mit Herstellern, Ingenieurbüros und dem GEOMAR Projektpersonal zeigte sich das mit den zurückgehenden Aktivitäten der marinen Kohlenwasserstoffexploration nur wenige Hersteller für mehrkanalige seismische Anlagen im Markt verblieben sind. Weiterhin ist kein Bieter für ein Mehrkanalsystem mit Signalfrequenzen im kHz-Bereich identifiziert worden. Für die Signalaufnahme sollte weiterhin auf Einzelhydrophone gesetzt werden, um eine individuelle Datenbearbeitung zu erlauben. Bei Bietergesprächen konnte ein neuer Hydrophontyp (Fa. HTI) identifiziert werden, dessen Einbaumöglichkeiten vorteilhaft waren und dessen Beschaffung kostengünstiger ausgefallen ist. Die Lagebestimmung der Hydrophone mit Bezug zur Signalquelle muss für Roll- und Stampfbewegungen des Geräteträgers korrigiert werden. Daher hat die Navigation des Geräteträgers die Aufgabe diese Bewegungen zu bestimmen. Weiterhin soll die geographische Position im getauchten Zustand ohne GPS mitgekoppelt werden. Hier konnte ein Systemanbieter (Fa. McArtney) gefunden werden, der das auf dem Geräteträger eingesetzte Inertialsystem mit Dopplerlog und Tiefenmessung (Drucksensor) zur Stabilisierung der Kursbestimmung verknüpft. Zur Stützung von außen wurde zusätzlich ein USBL System eingeplant, das eine akustische Einmessung des Geräteträgers relativ zum schleppenden Schiff vornimmt und eine verbleibende Drift des Inertialsystems mit Stützwerten der Position stabilisieren kann. Auch hier konnten die Bietergespräche eine Kosteneinsparung ermöglichen. Bei der Auswahl der Mehrkanalempfangselektronik konnte der ausgewählte Bieter (Fa. Geometrics) mit einer Neuentwicklung nun eine Signalabtastung mit 16 kHz (früher 8 kHz) anbieten und damit eine deutlich bessere Auflösung im Untergrund in Aussicht stellen. Durch die erzielten Einsparungen bei Hydrophonen und Navigation stand für die Signalquelle ein erweiterter Budgetrahmen in den Bietergesprächen zur Verfügung.

Die Anfrage nach einer Chirp Signalquelle mit einem Frequenzgang bis zu 16 kHz und einer für den Geräteträger passenden Baugröße traf auf eine laufende Neuentwicklung einer omnidirektionalen Schallquelle (Fa. iXblue). Die sonst üblichen Abstrahlwinkel von ca. 35° hätten bei den geringen Wassertiefen bei denen Seekabel vergraben werden deutliche Dämpfungen zu den Seiten bedeutet. In Verhandlungen mit dem Bieter konnte ein Preisgefüge gefunden werden, bei dem nunmehr zwei Signalquellen bestellt werden konnten. Damit ist die Möglichkeit gegeben im fertigen Ausbauzustand des Flügels anstelle einer zentralen Quelle in jedem Ausleger eine Signalquelle zu installieren. Damit kann ein seitliches Beleuchten des Vermessungsziels (Seekabel) erfolgen, das die gesamte Breite des Geräteträgers ausnutzt. Durch die längeren Laufwege entstehen stärkere Laufzeitunterschiede und somit ist eine bessere Identifikation des Zielsignales gegeben.

In den Bietergesprächen hat sich gezeigt, dass Engpässe in den Zulieferungen und in der Auftragsbearbeitung zu erheblich ausgedehnten Fertigungszeiten führen. Lieferzeiten der komplexen Systemkomponenten (Navigation, Signalquelle) bis zu 18 Wochen verzögern die Wareneingänge über das erste Projektjahr hinaus. Damit einher geht auch eine Verzögerung in der Bestückung des Geräteträgers mit den elektronischen Komponenten und deren Erprobung. Der Mittelgeber wurde hier rechtzeitig informiert.

Nach den Zuschlägen für die Bieter konnte anhand der technischen Beschreibungen die Gewichtsbestimmung für die Zuladung des Flügels ermittelt werden (Milestone M1.2). Im Weiteren wurden die Bedarfe für Verkabelung und Druckgehäuse bestimmt. Eine erste Voraussetzung war die Festlegung auf eine interne Netzwerkstruktur des Geräteträgers, die im Wesentlichen durch die Schnittstellen und Protokolle der Sensoren (Ethernet, serielle Übertragung) bestimmt wurde. Mit einem Schaltplan wurden Modems, Konverter, Datenleitungen und Spannungsverteiler festgelegt. Mit der resultierenden Bestimmung notwendiger Steckkontakte konnten dann Druckgehäuse für die Verteiler konstruiert und gefertigt werden.

In Absprache mit Partner emma Technologies wurde vorgesehen, die Hauptzugkräfte über einen Schleppdraht von einer mobilen Winde zu tragen. Dadurch kann die Konstruktion und Zugentlastung des Versorgungskabel einfacher und mechanisch weniger anfällig gestaltet werden. Das Versorgungskabel muss dennoch für höhere Zuglasten ausgelegt werden, um den eigenen Wasserwiderstand im Schleppbetrieb zu tragen und eine zusätzliche Sicherheitsmarge zu haben, falls zu viel Lose auf den Schleppdraht kommt. Marktrecherche und mangelhafte Erfahrungen in der Belastbarkeit mit Konkurrenzprodukten führten dazu Spezialkabel bei Fa. Leoni zu beauftragen. In der Folge des Ukraine Krieges musste Leoni Produktionslinien aus der Ukraine zurück nach Deutschland verlegen, wodurch z.B. das Schleppkabel erst mit halbjähriger Lieferzeit bedient werden konnte.

Auch wenn bei anderen Lieferanten weniger extreme Verzögerungen in der Auslieferung hingenommen werden mussten, wurden die Arbeiten an Kabelbäumen und Druckgehäusen gegenüber der Planung verzögert. Mit dem Zulieferer der Signalquelle wurde eine geteilte Auslieferung vereinbart, um die Verzögerung für Einbautests zu verringern. Eine kostenfrei gestellte Demonstrationsanlage konnte mit einer Testfahrt an Bord des FK LITTORINA genutzt werden, um erste Erfahrungen mit Chirp Sonarquellen und der Signalprogrammierung zu sammeln.

Mit dem Baufortschritt von Partner emma Technologies konnten erste Schleppversuche noch vor der Elektrifizierung mit der FB POLARFUCHS des GEOMAR im Innenbereich der Kieler Förde durchgeführt werden. Dabei hat der Geräteträger ein ausgeglichenes Schwimmverhalten gezeigt (Abb. 1).

Mit dem Eintreffen der Baugruppen konnte die Komplettierung der Kabelbäume fortgesetzt werden. Einbau der Hydrophone und Führung der Kabelbäume wurde bei Partner emma Technologies getestet (Abb. 2). Anschließend wurde der Geräteträger zum GEOMAR überführt. Neben dem Einbau der Hydrophone in die Ausleger des Geräteträgers konnten die Sensoren der Navigationsanlage im Geräteträger montiert und zusammengeschaltet werden (Meilenstein M2.1). Hierbei hat sich gezeigt, dass in der Praxis nicht alle Datenströme und Datenformate so gebündelt werden können, wie es geplant war. Insbesondere der Austausch zwischen Geräteträger und Schleppschiff erforderte mehr Leitungen als gedacht. Ein erweitertes Schleppkabel konnte nur mit 12 Monaten Lieferzeit angeboten werden. Lagerbestände anderer Projekte konnten mit parallel geführten Kabeln die notwendige Anzahl an Adern für einen Kabelbaum zwischen schleppendem Schiff und Geräteträger absichern und längere Ausfallzeiten in der Elektrifizierung verhindern.

Die grundlegende Funktionalität und der Datenfluss zwischen den einzelnen Komponenten des Geräteträgers wurde nach der Montage und Verkabelung soweit möglich in der Montagehalle geprüft. Bei diesen Tests hat sich ein Fehler in dem Lagesensor (INS) gezeigt, der eine Ansteuerung und Datenausgabe verhindert hat. Das INS System musste zur Reparatur an den Hersteller geschickt werden und stand erst nach drei Monaten wieder zur Verfügung, wodurch sich der Abschluss des Meilenstein M4.1 verzögert hat.

Abbildung 1: Erste Schleppversuche des Geräteträgers mit FB POLARFUCHS in der Innenförde von Kiel

Bei den Trockentests in der Montagehalle können Sensoren, wie z.B. die Signalquelle und der Geschwindigkeitssensor (Dopplerlog, DVL), die mit akustischen Signalen in der Wassersäule arbeiten nicht getestet werden. Diese Arbeiten wurden zunächst bei statischen Gerätetests an der Kaikante des GEOMAR überprüft (Abb. 3). Hierbei konnte die Synchronisierung von Signalquelle und Empfangsanlage erfolgreich umgesetzt werden. Es hat sich aber gezeigt, dass ein neues Chirp-Modul für die Datenerfassung für eine falsche Versionsnummer der Software erstellt wurde und erst eine Korrektur angefordert werden musste. Die interne Zeitbasis und geographische Position des INS konnte mit GPS kalibriert werden. Beim Zuschalten des DVL zeigte sich aber schnell eine Systemdrift, die eine nicht vorhandene Bewegung des Geräteträgers simulierte. Das Phänomen wurde einer möglichen Fehlmessung des DVL zugeschrieben. An der Kaikante des GEOMAR befindet sich der Geräteträger in einer steten Wasserströmung, die durch den Flusslauf der Schwentine verursacht wird. Es wurde angenommen, das vorbeiströmende Schwebstoffe fälschlicherweise eine Geschwindigkeitsmessung im DVL ausgelöst haben, obwohl dieser nicht über Grund bewegt wurde. Der Meilenstein M4.1 konnte somit erst mit 6 monatiger Verzögerung und ohne den Nachweis der Funktion des Bewegungssensors erreicht werden.

Abbildung 2: Einbau der Kabelbäume und Hydrophone in den Ausleger des Geräteträgers

Zwischenzeitlich wurde der Betrieb der FB POLARFUCHS am GEOMAR eingestellt. Damit stand nur noch der deutlich stärker ausgelastete FK LITTORINA für Testfahrten zur Verfügung. Anträge auf Testtage benötigten wegen der starken Nachfrage einen mehrwöchigen Vorlauf. Um längere Wartezeiten zu umgehen wurde gemeinsam mit Partner emma Technologies versucht ein anderes Schleppschiff im Bereich der Kieler Förde zu chartern, das zum Aussetzen/Bergen des Geräteträgers über einen Bordkran oder A-Rahmen am Heck verfügt. Bei Gesprächen mit Werften und Charterbetrieben konnte nur die Barkasse MV SAGITTA im Hafen von Laboe (7 km zum GEOMAR) ausfindig gemacht werden. Für eine erste Probefahrt wurde der Geräteträger per LKW in den Hafen Laboe gebracht und dort zu Wasser gelassen. Leider war festzustellen, das sich der Schiffskurs des MV SAGITTA bereits bei 0,5 m Wellenhöhe an Wind- und Wellenrichtung orientieren muss und keine frei Kurswahl für Testzwecke mehr möglich ist. Somit verbleibt nur der FK LITTORINA für Testfahrten, mit entsprechenden Wartezeiten für Testläufe.

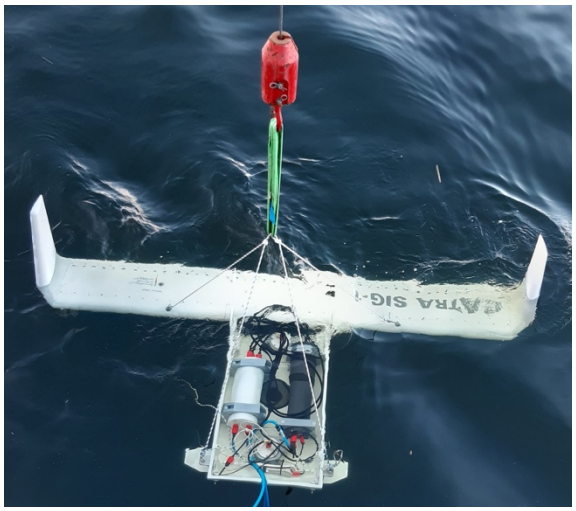

Abbildung 3: Statischer Gerätetest an der Kaikante des GEOMAR

Testfahrten in der freien Ostsee zeigten teilweise starke Rollbewegungen des Geräteträgers, mit weit über 30 Grad Neigung, wodurch der Geschwindigkeitssensor den Bodenkontakt verloren hat. Die resultierenden Fehlmessungen führen zu einer unrealistischen Drift des INS Systems. Die begrenzt auftretende außerordentliche Rollbewegung des sonst gut austarierten Geräteträgers wurde mit seitlich auftreffenden Strömungen in Verbindung gebracht. Durch wiederholte Anpassungen der Schleppgeometrie und der Führung des Schleppkabels wurde die Krafteinwirkung auf den Geräteträger verbessert.

Weitere Schleppversuche haben gezeigt, dass die Drift des INS System weiterhin unerwartet hoch ist. Zum Teil werden unrealistische Schleppgeschwindigkeiten ermittelt, zum Teil werden falsche Schleppkurse bestimmt, die Fehler der gekoppelten Position von mehreren Kilometern verursacht haben. Um ein Rücksetzen und kalibrieren des Systems mit GPS-Messungen auf See zu ermöglichen wurde ein zusätzliches Druckgehäuse für die GPS-Antenne entworfen und auf dem Geräteträger montiert. Zur Kontrolle des Azimuts im getauchten Zustand und für eine weitere Möglichkeit zur Stabilisierung des INS System wurde ein Flux-Gate Kompass nachgerüstet.

Zwischenzeitlich wurde für einen Schlepptest mit dem bei Partner emma Technologies gefertigten großen Geräteträger (13 m Spannweite) ein Testtag mit dem FS ALKOR beantragt. Der zerlegte Geräteträger wurde zunächst in der Werkhalle des GEOMAR vormontiert. Die für einen Anhängertransport geeigneten Segmente wurden dann an Bord FS ALKOR geladen und dort an Deck montiert (Abb. 4), um die Mobilität für wechselnde Einsatzorte zu bestätigen. Eine Elektrifizierung des Geräteträgers (Meilenstein M2.2) wurde nicht vorgenommen, da die Ausrüstung noch im kleinen Testgerät verbaut war. Zusammen mit dem großen Geräteträger wurde auch ein neuer größer dimensionierter Depressor eingesetzt. Beide Systeme haben bei den Schleppversuchen ein unproblematisches Verhalten gezeigt. Die Elektrifizierung des großen Flügels wurde weiter ausgesetzt, da die Systemfunktionalität für den Bewegungssensor im Testflügel noch nicht nachgewiesen wurde.

Die nächsten Fahrten mit FK LITTORINA wurden wieder dem Test des kleinen Geräteträgers und der Sensorik gewidmet. Hier wurden Auftriebskörper im Zentrum des Geräteträgers und

in erhöhter Position montiert, um die räumliche Trennung von Gewichtsschwerpunkt und Auftriebsschwerpunkt zu optimieren. Dies hat das starke Rollen des Geräteträgers unterdrückt, so dass der DVL zur Geschwindigkeitsmessung Bodenkontakt halten konnte. Dennoch wurde weiterhin eine starke Drift des INS System verzeichnet.

Um weitere Unterstützung bei der Behebung dieser Instabilität im Driftverhalten des INS zu erhalten wurde Kontakt zum Hersteller des INS aufgenommen. Die Reaktionszeiten des Herstellers gestalteten sich sehr langsam, da die INS Sparte an eine größere Firmengruppe verkauft worden war. Während zweier Probefahrten mit FK LITTORINA wurden gezielt angeforderte Logging-Dateien erzeugt, die dem Hersteller übermittelt wurden. Erste Analysen deuteten auf eine instabile Datenverbindung zwischen Lagesensor und Geschwindigkeitssensor hin. Zur Behebung wurde der Kabelbaum auf dem Geräteträger neu konfiguriert und ein zusätzliches Druckgehäuse mit Verteilerplatine hergestellt.

Abbildung 4: Der große Geräteträger wurde an Bord FS ALKOR montiert und für erste Schleppversuche zusammen mit dem neu gebauten Depressor zu Wasser gebracht

Die geschilderten Probleme und Wartezeiten für Testtage auf See haben zu einer deutlichen Verzögerung im Projektablauf geführt. Der Meilenstein M4.1 konnte nicht in der Projektlaufzeit abgeschlossen werden. Daher wurde beim Mittelgeber ein Antrag auf kostenneutrale Verlängerung gestellt. GEOMAR (FE Marine Geodynamik) hat für den Zeitraum der Verlängerung technisches und wissenschaftliches Personal bereitgestellt.

Um die geographische Positionierung des geschleppten Flügels zu protokollieren und das INS System stützen zu können wurde zusätzlich eine akustische Positionsvermessung des Flügels vom schleppenden Schiff (USBL) aufgebaut. Am schleppenden Schiff wird ein akustischer Transponder über einen Klapppfahl unter die Kiellinie abgesenkt. Antwort-Pings von einem zweiten akustischen Transponder auf dem geschleppten Geräteträger werden über Azimut, Laufzeit und Tiefenlage geortet und als GPS gestützte geographische Koordinate angezeigt.

Soweit möglich wurde während der Testfahrten die seismische Vermessung aktiviert und aufgezeichnet. Diese Daten wurden benutzt, um den Arbeitsablauf für die Verarbeitung von Navigation und seismischen Daten zu definieren. Softwarepakete aus der Explorationsindustrie für diese Vorabreiten sind in einem Forschungsprojekt wirtschaftlich nicht einsetzbar. Die notwendigen Algorithmen wurden dazu in eigenen Prozessanweisungen programmiert. Dies beinhaltet auch die Zuordnung der Signalspuren zu ihrem Reflexionspunkt am Meeresboden und dessen Einordnung in ein Gitterfeld entlang der Vermessungslinie als Grundlage für die spätere dreidimensionale Auswertung. Ebenso hat sich gezeigt, dass Standardpakete zur Interpretation der seismischen Daten nicht in der Lage sind die Koordinaten der Signalspuren mit Submeterangaben im Datenheader zu behandeln. Daher wurden im Rahmen der Prozesskette Datenformate und Dateien mit den Metadaten definiert, die eine externe und verlustfreie Weitergabe der Koordinaten sicherstellen.

Nach Ablauf der Projektverlängerung wurden noch einmal Hinweise zur Parametrisierung von INS System und Geschwindigkeitssensor vom INS Hersteller übermittelt. Mit diesen Informationen konnte während einer weiteren Testfahrt ein über weite Strecken stabiler Verlauf der Gerätepositionierung und räumlichen Lagebestimmung erreicht werden. Trotz der verbesserten Parametrisierung scheint der Einfluss des DVL Geschwindigkeitssensors noch nicht fehlerfrei zu sein. Die zusätzlichen Messungen mit dem USBL System liefern eine geographische Position des Schleppkörpers, die mit der Länge des Schleppdrahtes und dem Azimut des Schleppdrahtes verifiziert werden konnten. Dagegen führt die Koppelung des INS Systems immer noch zu Abweichungen, die sich auf wenige Meter beschränken und nicht mehr so stark ausfallen wie bei früheren Testfahrten beobachtet. Durch die USBL Messungen wird die Koppelung des INS automatisch wieder zurück gesetzt. Trotzdem müssen diese Korrekturen in dem Verlauf der registrierten Wegpunkte nachträglich korrigiert werden. Für die Bearbeitung der Navigationsdaten wurden daher zusätzliche Verarbeitungsschritte programmiert.

Da in der Reichweite von Tagesfahrten mit dem FK LITTORINA keine Stromtrassen erreichbar sind wurde die Festlandverbindung des Kieler Leuchtturm als Ziel für Testfahrten gewählt. Das Seekabel zum Leuchtturm Kiel ist in der Seekarte der Kieler Bucht verzeichnet (Abb. 5) und wird mit 10 cm Durchmesser beschrieben. Damit liegt das Kabel am unteren Ende des angestrebten Vermessungsziel für Seekabel von 7,5 cm bis 25 cm. Zudem ist die Lage in der Seekarte im Verhältnis zum Kabelquerschnitt recht ungenau und bietet nicht die optimale Referenz, um die Fähigkeiten eines neuen Gerätes zu erproben.

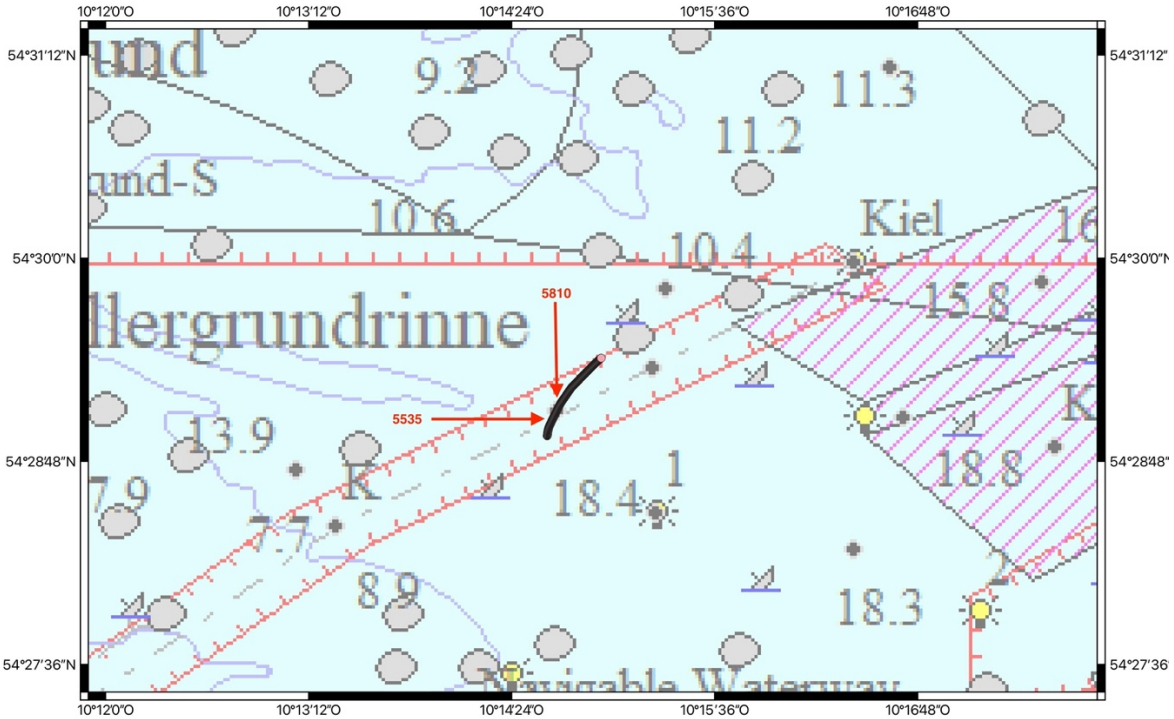

Abbildung 5: Ausschnitt der Seekarte Kieler Bucht. Das Versorgungskabel der Leuchtturm Kiel ist als gestrichelte schwarze Linie vom unteren linken Rand bis zum Leuchtturm im oberen rechten Drittel des Ausschnitts eingezeichnet. Die umrandende rote Zaun-markierung beschreibt das Sperrgebiet um das Kabel, in dem Aktivtäten mit Grundberührungen verboten sind. Als schwarzes dicke Linie ist der Testabschnitt P6011 eingezeichnet mit den Schusspunkten 5635 und 5810.

Dennoch sollte der Abschnitt P6011 (Abb. 5) der letzten Testfahrt in seinem südlichen Verlauf das Kabel zumindest kreuzen. Der Seekarte zufolge wäre dies bei Schusspunkt 5635 der Fall. Ein erstes Seismogramm des zentralen Hydrophon, (Ch 11) zeigt entlang des Messprofiles im Bereich des Schusspunkt 5635 (Abb. 5) keine auffälligen Signale (Abb. 6). Etwas weiter nördlich wird um den Schusspunkt 5816 (Abb. 5 & 7) eine Diffraktion der seismischen Energie vom Meeresboden bis in ca. 2 m Tiefe beobachtet. Derartige Diffraktionseinsätze werden von kleinen Störkörpern, wie z.B. einem Seekabel, erwartet. Eine sichere Unterscheidung von punktuellen Störkörpern und einem Seekabel kann aber erst in

der flächigen Auswertung der Messungen erfolgen.

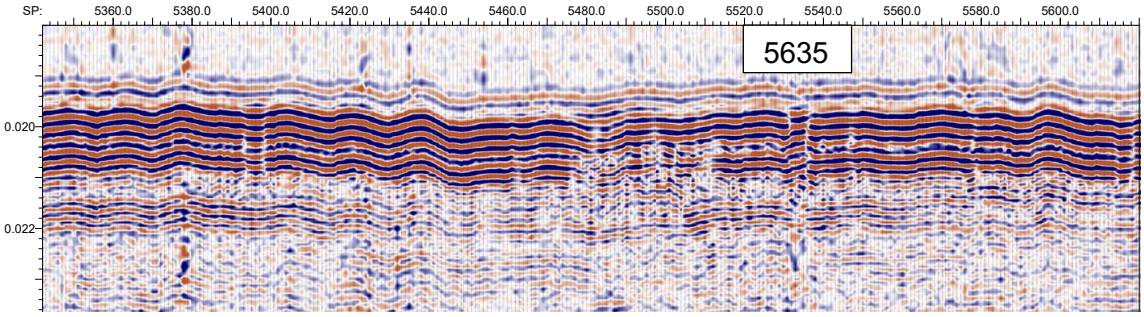

Abbildung 6: Seismogramm des zentralen Hydrophon (Ch 11) um den Schusspunkt 5635. Der Spurabstand beträgt 40 cm (Sektionslänge 112 m), die vertikale Achse zeigt die Zweiweglaufzeit in Sekunden. Gezeigt ist der Ausschnitt der Aufnahme in dem der Meeresboden und die unterliegenden Strukturen bis in ca. 2.5 m Tiefe.

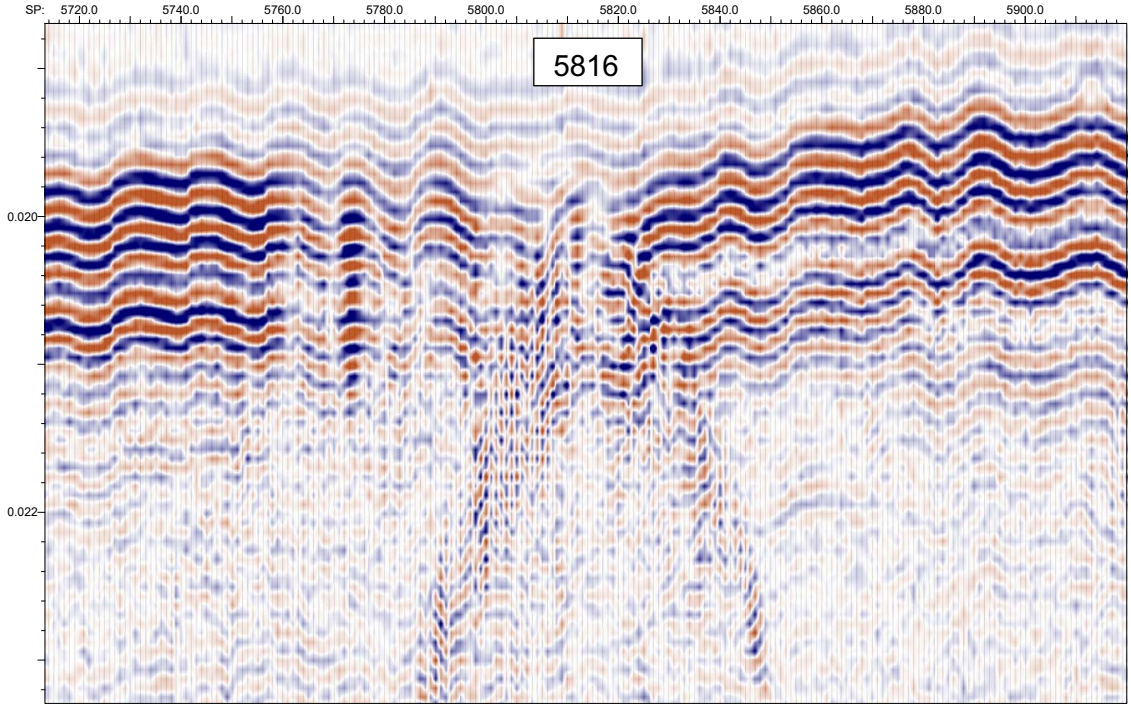

Abbildung 7: Seismogramm des zentralen Hydrophon (Ch 11) um den Schusspunkt 5816. Der Spurabstand beträgt 40 cm (Sektionslänge 80 m), die vertikale Achse zeigt die Zweiweglaufzeit in Sekunden. Gezeigt ist der Ausschnitt der Aufnahme in dem der Meeresboden und die unterliegenden Strukturen bis in ca. 2.5 m Tiefe.

Die Navigationsdaten des INS System wurden mit den neuen Routinen und den USBL Werten korrigiert und eine Berechnung der Gitterzuordnung (Inline und Cross-Line Profile) der einzelnen Signalspuren für eine 3D Bearbeitung ist erfolgt (Abb. 8). Tests mit verschiedenen Gittergrößen zeigen, das ein Gitterabstand von maximal 5 cm gewählt werden kann, um eine Gruppierung mehrerer Spuren in einer Gitterzelle zu vermeiden. Zugleich führt die Kurvenführung und azimutale Bewegungen des Schleppkörpers dazu, dass nicht alle Signalspuren (Hydrophone) des Flügels in eine Cross-Line fallen (Abb.8). Die Identifizierung von Objekten ist in dieser Darstellung nicht einfach möglich und bedarf weiterer Bearbeitung, wie z.B. einem Auffüllen der Leerspuren durch Interpolation. Die von Partner TEEC entwickelten Routinen zur Analyse der Signaleinsätze, die aus der Diffraktion des Wellenfeldes am Seekabel rührt ist hierdurch jedoch nicht eingeschränkt, da diese Verfahren direkt mit der ursprünglichen schussweisen Ordnung der Signalspuren arbeiten. Der Meilenstein M4.1 konnte somit noch abgeschlossen werden.

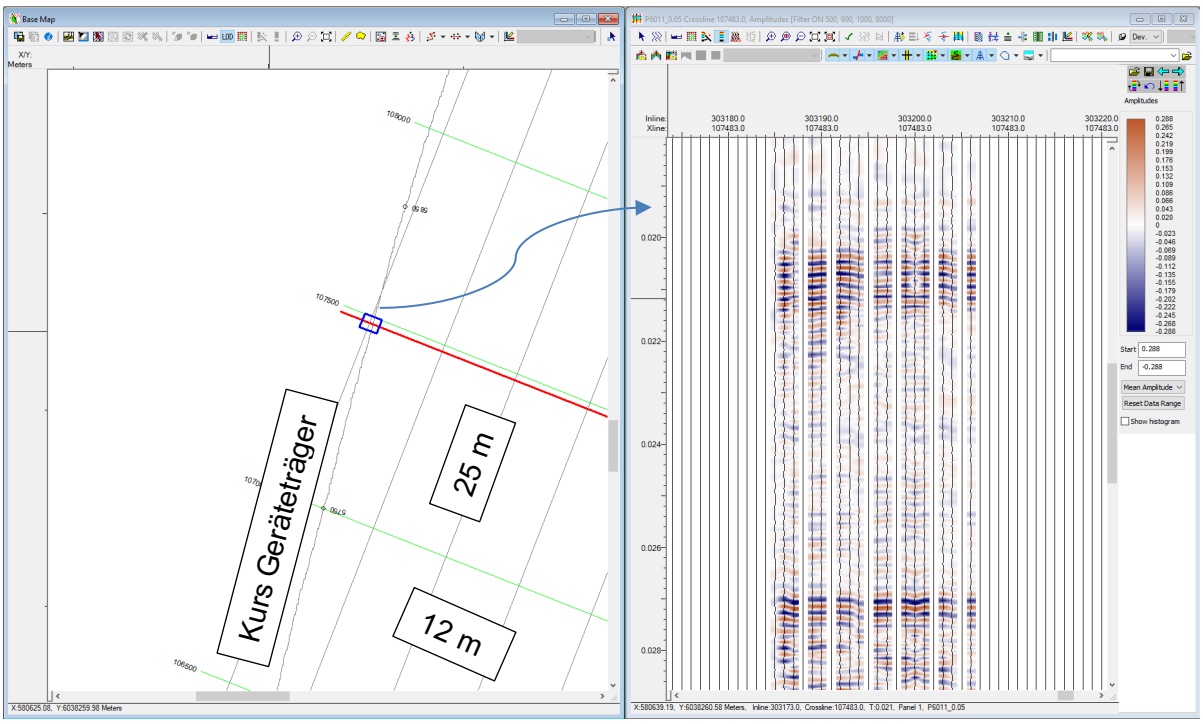

Abbildung 8: Bildschirmansicht der seismischen Interpretationssoftware. Links sind die rechtwinklig verlaufenden Gitterlinien des 3D Binning abgebildet. Die grünen Querlinien markieren das Gitter in Profilrichtung (25 m Abstand), die schwarzen Linien markieren das Gitter quer zur Profilrichtung in 12 m Abstand. Die gebogene dünne schwarze Linie markiert die zentrale Spur des Geräteträgers. Rechts ist die Sortierung der Signalspuren entlang der Querlinie 103512 zu sehen, die dem kleinen blauen Kasten in der linken Karte entspricht. Das rechte Seismogrammfenster überdeckt eine Breite von 4,5 m.

2 der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind mit den Personal- (je 50% Wissenschaftler und Ingenieur) und den Investitionsmitteln gegeben.

Die wissenschaftliche Tätigkeit hat in der Steuerung des Projektes, der Koordination mit den Verbundpartnern und vor allem in der planerischen Führung mit Blick auf die Zielsetzung und weitergehende Anwendbarkeit gelegen. Gemeinsam mit den Partnern wurden die wesentlichen Kennwerte des Systems festgelegt und als Grundlage für Ausschreibungen und Angebotsabfragen genutzt. Die Systemplanung und Sensorik wurde mit dem Ingenieur im Projekt und weiteren Experten der Forschungseinheit besprochen und spezifiziert. Zur planerischen Führung des Projektes gehörte auch die Entwicklung eines Arbeitsablaufes für die Vorbearbeitung der registrierten Sensorwerte und Formatdefinitionen für deren Speicherung. Zur Umsetzung der Arbeitsabläufe sind in der wissenschaftlichen Tätigkeit die notwendigen Skripte und Algorithmen programmiert und Schnittstellen für die Bearbeitung in kommerziellen Auswertepaketen geschaffen worden. Die Beantragung und Leitung von Testfahrten lag ebenso im Bereich der wissenschaftlichen Tätigkeiten.

Neben dieser Systemberatung hat die Ingenieurstätigkeit zur Aufgabe gehabt die notwendigen Pläne für Datenströme zu erstellen und daraus Bedarfe für Montageplätze, Kabelführungen, sowie Pläne zu Leitungs- und Netzwerkverbindungen zu erarbeiten. Mit Zuschlägen für einzelne Komponenten der Sensorik konnten die jeweiligen Schnittstellen definiert werden und daraus notwendige Kabelbäume und Verteiler definiert werden. Der Entwurf bis zur Fertigungsanweisung für Kabelbäume und Druckgehäusen lag ebenso in den Händen der Ingenieure, wie die anschließende Ausrüstung und Verkabelung. Hierbei wurde insbesondere mit Partner emma Technolgies in engem Austausch gearbeitet, damit die notwendige Integration in den Flügel geplant werden konnte. Ebenso mussten die Rahmenbedingungen des Geräteträgers in den Systemplänen der Sensorik beachtet werden. Neben der Ausrüstung des Geräteträgers wurde die Arbeitsumgebung an Bord des Schleppschiffes konfiguriert. Ein lokales Netzwerk wurde aufgesetzt, das den Datenfluss zwischen Geräteträger und den verschiedenen Kontrollrechnern und Systemanzeigen steuert. Gemeinsam mit den Wissenschaftlern wurde die Handhabung des Geräteträgers an

Bord kleiner Schiffe erarbeitet und die Testfahrten technisch betreut.

Bei den Investitionsmitteln wurden die größten Posten von Registrierung, Signalquelle und Navigation gebildet. In Bietergesprächen konnte für die Navigation ein Systemanbieter (MacArtney, Kiel, Deutschland) gefunden werden und gegenüber der Beauftragung einzelner Lieferanten für jede Komponente eine erhebliche Einsparung erzielt werden. Das Konzept der Signalaufnahme durch Einzelhydrophone ist umgesetzt worden. Der vom Anbieter (HTI, Gulfport, USA) empfohlene neue Hydrophontyp hat sich bewährt und ebenfalls zu einer Einsparung geführt.

Mit dem Ansinnen kleine Objekte meeresbodennah durch Schalluntersuchungen abzubilden bewegen wir uns technisch im Bereich der Sedimentlote. Für die Registrierung von bis zu 60 einzelnen Datenkanälen (Hydrophonen) konnte im Portfolio der hier tätigen Hersteller keine Erfassungsanlage gefunden werden. Daher ist die Aufgabe eine Mehrkanaldatenerfassung aus dem Bereich der Explorationstechnik mit einer hochfrequenten Signalerzeugung aus dem Anwendungsfeld der Sedimentuntersuchung zu verbinden geblieben. Wird in der Explorationsarbeit mit Signalen im Bereich einiger hunderter Hertz gearbeitet, so werden bei Sedimentuntersuchungen Quellen mit Signalfrequenzen von einigen zehner bis hunderter Kilohertz eingesetzt. Die Marktrecherche hat einen Anbieter (Geometrics, San Jose, USA) gefunden, der seine Datenerfassung für bis zu 16 kHz Samplingrate erweitert hat.

Synthetische Modellrechnungen der Voruntersuchung hatten gezeigt, dass eine möglichst breite Auslage der Empfangssignale mit der erweiterten Apertur die Aufnahme der gesuchten Diffraktionssignale durch größere Laufzeitunterschiede unterstützt. Gleichzeitig wird bei einer seitlichen Beschallung des Zielobjektes die Energie der Rückstreuung gegenüber einer senkrechten Anordnung deutlich erhöht. Aus diesem Grund wurde für den späteren großen Flügel ein Einsatz von zwei Signalquellen in den Flügelenden favorisiert. In den Bietergesprächen konnte ein Anbieter (iXblue jetzt Exail, Saint-Germain-en-Laye, Frankreich) gefunden werden, der mit der Eigenentwicklung einer neuen kompakten Signalquelle einen Frequenzbereich von 2 kHz bis 16 kHz abdecken kann. Ein weiterer bedeutender Vorteil dieser Signalquelle ist die omnidirektionale Abstrahlung der Energie. Die sonst übliche Fokussierung der Einstrahl-Echolote auf 35° Öffnungswinkel hätte in dieser Anwendung durch die starke seitliche Dämpfung erhebliche Nachteile zur Folge. Mit der Akzeptanz einer späteren Auslieferung der Quelle und einer Überbrückung mit einem Demonstrator konnten so günstige Konditionen ausgehandelt werden, dass der Erwerb zweier Signalquellen möglich war.

3 der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Überwachung der Tiefenlage von Seekabeln wird von den Genehmigungsbehörden für die im Meeresboden vergrabenen Abschnitte in wiederholten Zeitabständen verlangt. Hierfür können vier Methoden angewendet werden.

1. Das Impuls-Neutronen Verfahren kann Gegenstände im Untergrund auf Grund wechselnder chemischer Eigenschaften (Metall gegenüber Sediment) sichtbar machen (z.B. Kampfmittelräumung). Dieses Verfahren ist nicht überall zugelassen, es erfordert wegen dem Einsatz einer Strahlenquelle höhere Arbeitsschutzmaßnahmen und deckt die geforderte Reichweite von mind. 2 m nicht ab (Köhli and Schmoldt, 2021). Eine weitere Betrachtung ist daher nicht erfolgt.
2. Magnetfeldvermessungen versuchen Anomalien des Erdmagnetfeldes, die durch das Seekabel hervorgerufen werden, zu erkennen und aus der Feldstärke die Tiefenlage zu bestimmen. Für Kabel mit Stromfluss sind die erzeugten Anomalien nicht stabil genug, um sicher identifiziert zu werden. Bei der Kabelproduktion eingebrachte dauerhafte magnetische Signaturen können nur bei ausgeschaltetem Kabelbetrieb (Inkaufnahme von Umsatzverlusten) detektiert werden. Dabei sind die Signale häufig so schwach, dass eine kontinuierliche Vermessung nicht sicher gelingt.
3. Akustische Vermessungen mittels hochauflösender Bathymetrie oder Seitensichtsonar sind für freiliegende Kabel geeignet oder erfordern einen sehr weichen und ebenen Untergrund (Deimling et al., 2016; Schock, 2008).
4. Die seismische Standardvermessung kann nur einen 2D Schnitt durch den Untergrund abbilden. Daher ist eine der Kabeltrasse folgende Vermessung nicht möglich. Bisher werden Vermessungen quer zur Trasse durchgeführt. Dabei richtet sich der Abstand nach dem Biegeradius des Kabels, um eine Interpolation der Vergrabungstiefe zu ermöglichen.

Bisher entwickelte 3D Systeme (Tab. 1) werden an der Wasseroberfläche geschleppt (Gutowski et al., 2008; Vardy et al., 2008) oder an einem Überwasserschiff montiert (Dinn, 2012). Diese Systeme sind nur für Wassertiefen von wenigen 10er Meter einsetzbar und können schon bei 30 cm Wellenhöhe nicht mehr genutzt werden (Dinn, 2012). Getauchte Systeme sind an den langsamen Profilfortschritt eines ROV gebunden oder werden durch begrenzte Energieressourcen eines AUV eingeschränkt (Dinn, 2012). Autonome Fahrzeuge benötigen darüber hinaus eine automatische Objekterkennung, um Abweichungen der Kabeltrasse folgen zu können (Nikolovska, 2015; Stavenhagen, 2016), die für eingegrabene Kabel bisher am Markt nicht verfügbar ist. Daher erfolgt klassischer Weise eine Überprüfung des Kabelverlaufs mit einstrahligen Sedimentloten und einer Profilierung quer zur Trassenrichtung.

Name	Anbieter	Messmethode	Einsatzart
GeoChirp 3D	Kongsberg Sand Geophysics	Chirp bis 13 kHz Hydrophonarrays 12.5 cm Mittelpunktabstand	an der Oberfläche geschleppt
SES 2000	Innomar	Parametrischer Beam (100 kHz / 2-20 kHz)	Montage am Schiff
Smartrack	Innovatum	Passive / aktive Magnetfledvermessung Reichweite 6 m – 8 m	ROV basiert
Sub-bottom imager	Pangeo subsea	Chirp 4.5 kHz – 12.5 kHz 40 Hydrophone im Arrayblock 7.5 cm Mittelpunktabstand	ROV basiert
TSS350 & TSS 440	VT TSS Ltd.	Ton Detektion, 25 Hz Signal im Seekabel Auflösung bis 1 cm Kabel in 0.6 m Tiefe	ROV basiert

Tabelle 1: Am Markt verfügbare Systeme, die in einer vorbereitenden Recherche gefunden wurden

In synthetischen Voruntersuchungen konnte gezeigt werden, das mit einem seismischen 3D Vermessungssystem die notwendige seitliche Überdeckung und vertikale Auflösung für eine trassenfolgende Abbildung eines Seekabels gelingen kann. Eingesetzt auf einem Geräteträger, der vom Seegang weitgehend unabhängig gefahren werden kann, ist eine kontinuierliche und effiziente Vermessung und Nachweis der Lage des Seekabels möglich.

Bisher eingesetzte seismische 3D Verfahren (z.B. P-Cable) sind nicht für die notwendigen hohen Signalfrequenzen (kHz) verfügbar. Wie unter 3.) ausgeführt sind Signalquellen und mehrkanalige Registrierung nicht von einem Systemanbieter erhältlich. Geschleppte Geräteträger, die in geringer Wassertiefe weitgehend vom Seegang entkoppelt werden können und dennoch keine zu hohen technischen Anforderungen an die Druckkörper stellen sind in einer für 3D Vermessung geeigneten Bauweise nicht am Markt verfügbar.

Aus diesen Gründen konnte das Verfahren einer hochauflösenden mehrkanaligen 3D seismischen Objektvermessung nur mit einer neuen Konfiguration einzelner Systemkomponenten und einem speziell entwickelten Geräteträger umgesetzt werden.

4 des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Wie unter II.3.) beschrieben wurde mit dem neuen hochauflösenden seismischen 3D Mehrkanal System eine Geräteplattform entwickelt, die erstmals eine kontinuierliche Abbildung eines vergrabenen Seekabels ermöglicht. Insbesondere mit der aktuellen Diskussion zum besseren Schutz und Überwachung mariner Infrastruktur und dem zunehmenden Ausbau von Windenergieanlagen auf See ist mit einem Aufweichen der Dokumentationspflicht durch die Genehmigungsbehörden nicht zu rechnen. Seitens der Kabelbetreiber ist ein erhöhter Bedarf an Dokumentation zu erwarten.

Weitere Anwendungsmöglichkeiten sind bei der Kartierung von verklappter Munition und in archäologischen Projekten zu sehen. Derzeitige Anwendungen zur Munitionssuche benutzen Oberflächenkartierungsverfahren. Eingespülte Munition kann nur durch engmaschiges Abfahren mit einstrahligen Sedimentloten erfasst werden. Eine weitere Anwendung ist in der marinen Archäologie denkbar, wo vermehrt in flachen Küstengewässern nach Hinweisen auf heute überspülte frühere Siedlungsbereiche gesucht wird. Kennzeichen für Zielgebiete einer Taucheruntersuchung sind zum Beispiel durch die Kartierung umgefallener Bäume im Sediment, die ein ausspülen von Siedlungsartefakten verhindert haben, zu finden. Weiteres Interesse konnte bei Firmen für Hafenbau und Baggergut geweckt werden, für die eine flächige Kartierung wechselnder Gesteinskompaktion im Untergrund wichtig ist.

Die erste Vorstellung des Projektes bei der, von GEOMAR für Technologietransfer und Patentverwertung beauftragten, TUTECH Innvation GmbH ist auf Interesse zur weiteren Verwertung gestoßen. TUTECH verfolgt die weitere Entwicklung der Patentanmeldungen und hat ein Exposé zur Vermarktung (Abb. 9) erstellt.

GEOMAR
Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel

IP Management
TECHNOLOGY AND KNOWLEDGE TRANSFER

High-Resolution 3D Measurement System for Submarine Cables and Small Objects in the Seabed

FOCUS SECTORS
- Maritime infrastructure
- Renewable energy
- Offshore wind parks
- Archaeology exploration
- Munitionsdetection

PROJECT KEY WORDS
- Seismic measurements
- Submarine cable installation

DEVELOPMENT STATUS
- Proof of concept
- Performance successfully evaluated
- Prototype demonstration

PATENT PROCEDURE STATUS
- DE and European patent application filed

POTENTIAL FOR COOPERATION
- R&D cooperation
- Licensing
- Transfer of rights

GEOMAR
CATRA Project

Ref: GEO014

Competitive Advantages
- High-resolution imaging
- Real-time measurements
- Reliable, precise and cost-effective
- Penetration depth up to 10 m
- Environment friendly

Background & Innovation

Europe's energy supply and communication networks rely heavily on a vast network of submarine cables in the North Sea and Baltic Sea. As offshore wind parks continue to expand as part of the transition to renewable energy, additional cable routes are becoming necessary. It is essential to ensure that these cables are buried deep enough in the seabed and properly covered with sediment according to regulatory standards.

However, there is currently no accurate measurement system available for efficient and economic monitoring of submarine cables beneath the seabed during operation.

The inventors developed an Innovative 3D Measurement System for submarine cables and small objects, that enables an accurate and cost-effective monitoring of the burial depth in real-time.

How It Works

The invention features an innovative underwater dragged device carrier (see Fig. 1), which is stabilized and decoupled from sea motion by modern hydrofoils to ensure precise seismic measurements in real-time.

A central chirp source emits high-frequency acoustic signals (3kHz to 9kHz), which are received by hydrophones positioned along the device carrier.

The collected data is then transmitted to a survey vessel. Advanced signal processing techniques, including AI-driven analysis, ensure high-resolution imaging.

Applications
- **Monitoring of Submarine Cable Routes:** Ensuring the required burial depths of submarine cables in the seabed.
- **Preliminary Surveying of Cable and Pipeline Routes:** Identifying potential obstructions.
- **Archaeological Exploration:** Searching for submerged structures and artifacts.
- **Munitions Detection:** Locating abandoned explosive devices

Fig. 1: Underwater dragged device carrier with innovative hydrofoils for stabilization.

TUTECH
TUTECH INNOVATION GMBH
IP Management
Laurens Pudewill
Harburger Schloßstraße 6-12
21079 Hamburg - Germany
+49 40 766296543
pudewill@tutech.de
www.tutech.de

Abbildung 9: Exposé zur Vermarktung des Geräteträgers

5 des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Bietergespräche wurden Neuentwicklungen für die Signalregistrierung und Signalerzeugung bekannt. Die Signalerfassung konnte dadurch auf einen Frequenzbereich bis 16 kHz erweitert werden. Hierdurch ist eine bessere Ausnutzung möglicher Signalfrequenzen und damit der Auflösung (Nyquistfrequenz 8 kHz) möglich geworden. Die Neuentwicklung einer kompakten Chirp Signalquelle mit omnidirektionaler Abstrahlung sorgt

für ein ausgeglichenes Energiespektrum des ausgesendeten Wellenfeldes gegenüber den ursprünglich verfügbaren Schallwandlern mit max. 35° Öffnungswinkel.

Im Verlauf des Projektes wurde die Förderung des Fraunhofer IWES und MTU/FB5 der Universität Bremen durch das BMWi (SASACD Seismo-Acoustic Synthetic Aperture Cable Detection / Entwicklung eines seismoakustischen Abbildungsverfahrens zur Kabeldetektion und Bestimmung der Tiefenlage (Depth of Burial) im Offshore-Bereich) bekannt. Aufgrund der kurzen öffentlichen Beschreibung sind keine für CATRA relevanten Details erkannt geworden. Die weitere Beobachtung hat gezeigt, dass die Fraunhofer-Gesellschaft in einer Offenlegungsschrift einen Patentantrag auf die Nutzung von Diffraktionsenergie zur Detektion von Objekten im Untergrund gestellt hat (DE 10 2019 117 587 A1 2020.12.31). GEOMAR hat hierzu eine Beratung mit Partner TEEC durch die Patent- und Verwertungsagentur für die wissenschaftlichen Einrichtungen in Schleswig-Holstein GmbH (PVA) veranlasst. Nach telefonischer Auskunft der PVA, die auch die Patentanträge der CATRA Antragsteller betreut, waren keine dem Projekt CATRA entgegenstehende Einschränkungen zu erwarten.

6 der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11

Wenn zur Wahrung berechtigter Interessen des ZE oder Dritter oder aus anderen sachlichen Gesichtspunkten bestimmte Einzelheiten aus dem Bericht vertraulich zu behandeln sind (z. B. Wahrung der Priorität bei Schutzrechtsanmeldungen), so hat der ZE den ZG ausdrücklich darauf hinzuweisen.

Bisher sind keine Ergebnisse erreicht worden, die einen schlüssigen Nachweis zum Abbildungserfolg eines Seekabels zeigen. Daher wurde bisher von einer Veröffentlichung abgesehen. Die Datenbearbeitung der letzten Testfahrt soll aber auch nach Projektende weiterverfolgt werden. Bei erfolgreichem Ergebnis wird eine entsprechende Veröffentlichung in Fachzeitschriften erfolgen.

Über den Technologietransfer und die Agentur TUTECH ist eine Bekanntmachung der Geräteentwicklung mit dem aktuellen Entwicklungsstand durch gezieltes Ansprechen von Betreibern von Seekabeln und Munitionssuche vorgesehen (Exposé, s. Kap. II.4.).