

Journal of Applied Hydrography

HYDROGRAPHISCHE NACHRICHTEN

10/2026

HN 135

Hydrographie
im
Nahbereich



Ein Strahl in Bewegung

Ein Beitrag von RALPH BECKER-HEINS und JULIAN HÖPE

Mechanisch scannende Imaging-Sonare bauen ein Bild aus zeitlich nacheinander aufgenommenen Strahlen auf. Bewegt oder dreht sich die Plattform während eines Scans, gehören die einzelnen Messlinien zu unterschiedlichen Fahrzeugposen; eine naive Darstellung in einem gemeinsamen Polarraster verzerrt daher stationäre Konturen. Am Beispiel SeaFox wird beschrieben, wie zeitlich zugeordnete Navigations- und Lagedaten jede Scanlinie auf einen gemeinsamen Referenzzustand transformieren können. Der so geometrisch konsistentere Datenbestand erleichtert die Wiederaufassung und Interpretation im Nahbereich. Räumlich überlappende Scans zu verschiedenen Zeitpunkten eröffnen außerdem die umgekehrte Informationsrichtung: Wiedererkennbare Bodenmerkmale können mittels Feature Tracking oder Scan Matching zur Schätzung relativer Poseänderungen und der Fahrt über Grund beitragen. Der Beitrag grenzt diese Perspektive gegenüber dem demonstrierten Ansatz zur Bewegungskompensation ab und ordnet beide Ansätze hinsichtlich Multibeam-Sonar, optischer Identifizierung sowie ihrer technischen Voraussetzungen und Grenzen ein.

Nahbereichssonar | mechanisch scannendes Imaging-Sonar | Bewegungskompensation | SeaFox |
Scan Matching | Unterwassernavigation
short-range sonar | mechanically scanning imaging sonar | motion compensation | SeaFox |
scan matching | underwater navigation

Mechanically scanning imaging sonars construct an image from beams acquired in sequence over time. If the platform moves or rotates during a scan, the individual scan lines correspond to different vehicle poses; a simplistic representation in a common polar grid therefore distorts stationary contours. Using the SeaFox as an example, this paper describes how temporally correlated navigation and attitude data can transform each scan line to a common reference state. The resulting, geometrically more consistent dataset facilitates re-localisation and interpretation at close range. Spatially overlapping scans taken at different times also open up the reverse direction of information flow: Recognisable seabed features can be used via feature tracking or scan matching to estimate relative pose changes and the track over ground. This paper distinguishes this perspective from the demonstrated approach to motion compensation and classifies both approaches in terms of multibeam sonar, optical identification and their technical prerequisites and limitations.

Autoren

Prof. Capt. Ralph Becker-Heins ist Principal Expert Autonomous Maritime Navigation bei der TKMS Atlas Elektronik GmbH in Bremen. Julian Höpe arbeitet dort an Verfahren zur Verarbeitung und Bewegungskompensation von Sonardaten.

ralph.becker-heins@tkmsgroup.com
julian.hoepe@tkmsgroup.com

Nahbereich beginnt nach der Detektion

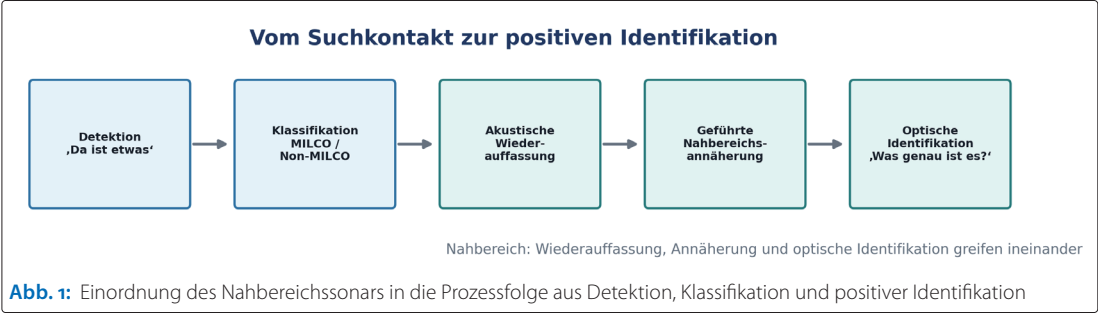
Im Kontext der Minenjagd sind Detektion, Klassifikation und Identifikation voneinander zu unterscheiden. Die Detektion zeigt zunächst, dass sich an einer Position ein auffälliger Kontakt befindet – vereinfacht: »Da ist etwas.« In der anschließenden Klassifikation wird bewertet, ob der Kontakt als mine-like contact (MILCO) oder als non-mine-like contact (Non-MILCO) weiterzuverfolgen ist. Erst die Identifikation beantwortet die Frage, um welches konkrete Objekt es sich handelt. Ein als MILCO klassifizierter Kontakt muss dafür wiederaufgefasst, kontrolliert angenähert und aus kurzer Entfernung untersucht werden. Schematisch ist der Prozess beginnend mit der Detektion in Abb. 1 dargestellt.

TKMS beschreibt SeaFox als faseroptisch geführtes Mine Identification and Disposal System (MIDS) mit Zielsuchsonar und integrierter Kamera. Es dient dazu, zuvor detektierte und klassifizierte Unterwasserobjekte aufzufinden, zu identifizieren

und – in der entsprechenden Fahrzeugausführung – zu neutralisieren (TKMS Group o. J.). Hydrographisch interessant ist vor allem das lokale Messsystem aus Sonar, Navigation, Fahrzeugführung, Anzeige und Bediener: Im Nahbereich verdichtet es die Information vom klassifizierten Suchkontakt bis zur belastbaren Identifikation.

Mechanisches Scanning als Systementscheidung

Beim mechanisch scannenden Imaging-Sonar wird ein schmaler akustischer Fächerstrahl schrittweise über einen Sektor gedreht. Anders als ein Multibeam-Imaging-Sonar erfasst es den Sektor daher nicht weitgehend gleichzeitig. Welche Sonarart für eine konkrete Nahbereichsaufgabe zweckmäßig ist, ergibt sich jedoch nicht allein aus Bildrate oder Auflösung. Maßgeblich sind unter anderem Sicht- und Schallausbreitungsbedingungen, benötigte Reichweite und Abdeckung, Fahr-



zeugstabilität und Eigenbewegung, Missionsdauer und -profil, Bauraum, Energie- und Datenbudget, Integrationsaufwand sowie die Kosten des Sensors und des Gesamtfahrzeugs (siehe Tabelle 1). Mechanisch scannende Sonare bleiben deshalb für Navigation und Scanregistrierung Gegenstand aktueller Forschung (Hansen et al. 2024).

Der Kostenaspekt erhält bei einem Mine-Disposal-Vehicle besonderes Gewicht. Die zur Neutralisation eingesetzte SeaFox-C-Variante ist als selbstzerstörendes ROV für den Verbrauch am Ziel vorgesehen. Ein technisch geeigneter, zugleich vergleichsweise preisgünstiger Nahbereichssensor kann deshalb systemisch vorteilhaft sein. Diese generische Abwägung beschreibt jedoch noch nicht, welche Kriterien die konkrete SeaFox-Auslegung historisch bestimmt haben.

Wie Fahrzeugbewegung eine stationäre Kontur verzerrt

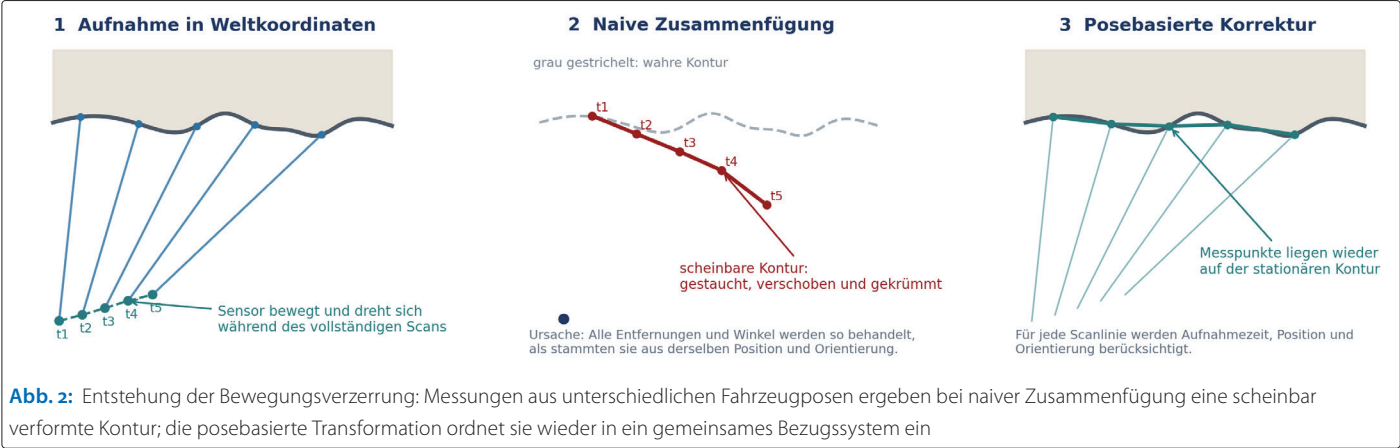
Jede Scanlinie enthält nicht nur Entfernung und Strahlrichtung, sondern gehört zu einer bestimmten Position und Orientierung des Fahrzeugs. Werden Linien, die zu den Zeitpunkten t1 bis t5 aus verschiedenen Posen aufgenommen wurden, so zusammengefügt, als stammten sie aus derselben Pose, werden ihre lokalen Koordinaten fälschlich gleichgesetzt. Eine stationäre Boden- oder Objektkontur erscheint dadurch verschoben, gestaucht, gedehnt oder gekrümmt. Abb. 2 zeigt getrennt die reale Aufnahmegeometrie, die fehlerhafte Zusammenfügung und die posebasierte Rückführung auf die wahre Kontur. Bei der naiven Zusammen-

fügung werden alle Messpunkte unkompensiert in eine Darstellung übertragen. Die Referenzpose, in der naiven Darstellung aus Abb. 2 als schwarzer Punkt gekennzeichnet, ist in diesem Fall die Pose des Sensors zum Zeitpunkt t1.

Für den Bediener ist dies mehr als ein Darstellungsfehler. Objektkonturen, Schallschatten und Bodenreliefs stützen Wiederauffassung und Annäherung; geometrische Instabilität erschwert sowohl die menschliche Interpretation als auch Segmentierung, Merkmalsextraktion und automatische Objekterkennung (Mallios et al. 2009; Burguera et al. 2012).

Kriterium	Mechanisch scannendes Sonar	Multibeam-Imaging-Sonar
Zeitbezug	Bild wird sequenziell aufgebaut; Bewegung muss beim Zusammenfügen berücksichtigt werden.	Sektor wird weitgehend gleichzeitig erfasst; hohe Aktualisierungsrate.
Abdeckung	Großer, flexibel wählbarer Scanbereich bis hin zur Rundumsicht möglich.	Typischerweise vorausgerichteter Sektor; Geometrie durch das Array festgelegt.
Bewegte Plattform	Ohne Kompensation prinzipbedingt anfällig für geometrische Verzerrung.	Für dynamische Darstellung vorteilhaft, aber ebenfalls auf korrekte Pose- und Einbauparameter angewiesen.
Integration	Kompakte Sensorik und vergleichsweise moderater Energie-, Daten- und Integrationsbedarf sind möglich.	Höherer Array-, Verarbeitung- und Datenaufwand; dafür dichte Bildfolgen.
Kosten	Vergleichsweise einfacher Wandler- und Verarbeitungsaufbau ermöglicht in der Regel geringere Sensorkosten.	Array, Empfangskanäle und Signalverarbeitung führen typischerweise zu höheren Beschaffungs- und Integrationskosten.

Tabelle 1: Anwendungsbezogene Gegenüberstellung im Nahbereich



Echtzeitnahe Bewegungskompensation

In einem SeaFox-bezogenen Demonstrator wurde die fortlaufende Kompensation von Sonardaten aus mechanisch scannenden Imaging-Sonaren untersucht (Höpe 2025). Sonar-, Navigations- und Lagedaten besitzen eigene Zeitstempel und Aktualisierungsraten. Für jede Scanlinie wird deshalb der Fahrzeugzustand zum Aufnahmezeitpunkt bestimmt; fehlen zeitgleiche Navigationswerte, können sie innerhalb eines durch Messwerte begrenzten Intervalls interpoliert werden.

Die Bildpunkte einer Scanlinie werden anschließend aus ihrem damaligen Fahrzeugkoordinatensystem in das Koordinatensystem eines gemeinsamen Referenzzeitpunkts transformiert. In einem gleitenden Zeitfenster verlassen ältere Linien die Darstellung, während neue hinzukommen. Damit dies nutzbar bleibt, müssen Zeitbasis, Sensordaten, Posezuordnung und Visualisierung als eine Verarbeitungskette behandelt werden: Fehler an einer dieser Stellen erscheinen als Restverzerrung oder zusätzliche Latenz.

Von der Bildkorrektur zur Bewegungsbeobachtung

Die Bewegungskompensation nutzt vorhandene Navigation zur Korrektur des Sonarbilds. Räumlich überlappende Scans erlauben prinzipiell auch die Gegenrichtung: Werden ortsfeste Kanten, Reliefwechsel, Schallschatten oder Intensitätsmuster wiedererkannt, kann aus ihrer relativen Verschiebung die Bewegung des Fahrzeugs gegenüber dem Meeresgrund geschätzt werden (Abb. 3). Feature Tracking verfolgt ausgewählte Merkmale; Scan Matching registriert größere Bild- oder Punktausschnitte. Beide Verfahren basieren auf der relativen Poseänderung statischer Objekte innerhalb der Darstellung. Translation und Rotation zwischen zwei Referenzzuständen liefern eine relative Poseänderung der Kontur und – bezogen

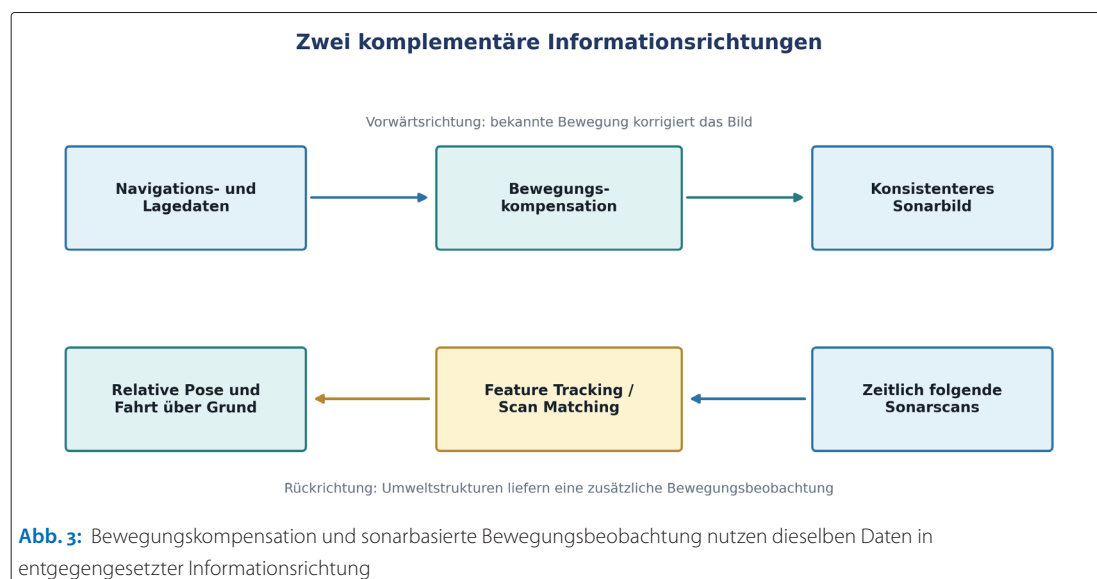
auf das Zeitintervall – eine Schätzung der Fahrt über Grund (Burguera et al. 2012).

Für SeaFox könnte eine solche Beobachtung die Nahbereichswahrnehmung um eine bodenbezogene Navigationsinformation ergänzen und mit Trägheits-, Lage-, Tiefen- oder Geschwindigkeitsbeobachtungen fusioniert werden. Sie ersetzt weder eine robuste Navigationslösung noch ein Doppler Velocity Log, kann aber in strukturreicher Umgebung eine zusätzliche Stützung liefern. Ihre Aussagekraft bleibt jedoch von der Qualität der zur Vorentzerrung verwendeten Navigations- und Lagedaten abhängig.

Beobachtbarkeit, Unsicherheit und Verifikation

Sonarbasierte Odometrie hängt von der Szene ab. Markante Reliefs und technische Strukturen bieten eher belastbare Korrespondenzen als homogener Meeresgrund; Wiederholungsmuster können falsche Zuordnungen erzeugen, bewegte Objekte verletzen die Annahme einer statischen Umwelt. Zudem verändern Blickwinkel, Abschattung, Speckle, Mehrwegeausbreitung und Sensoreinstellungen die akustische Erscheinung. Bewegungskompensation wiederum bleibt von Zeitstempeln, Posequalität und geometrischer Kalibrierung zwischen Sensor- und Fahrzeugrahmen abhängig. Qualitätsmaße, Ausreißererkennung und eine explizite Unsicherheitsbehandlung sind daher Voraussetzung für eine belastbare Nutzung.

Für die Verifikation sind drei voneinander abzugrenzende Nachweisebenen relevant. Auf der Darstellungsebene ist die geometrische Konsistenz der kompensierten Sonardaten gegenüber einer unabhängigen Referenz zu bewerten. Auf der Registrierungsebene muss sich zeigen, ob Merkmale oder vollständige Scanausschnitte unter wechselnden Bodenarten, Blickwinkeln und Fahrzuständen reproduzierbar zugeordnet werden können.



Auf der Systemebene ist schließlich der messbare Beitrag der Sonarbeobachtung zu einer fusionierten Navigation nachzuweisen. Ein positives Ergebnis auf einer Ebene ersetzt dabei nicht den Nachweis auf der nächsten. Offene Datensätze mit Ground-Truth-Pose ermöglichen reproduzierbare Methodenvergleiche (Hansen et al. 2024), bilden fahrzeug- und einsatzspezifische Bedingungen jedoch nur begrenzt ab und ersetzen deren Validierung nicht.

Akustisches und optisches Bild im Nahbereich

Sonar und Kamera beantworten unterschiedliche Fragen. Akustische Bilder ermöglichen Wiederaufassung, Klassifikationsverdichtung und räumliche Annäherung auch bei eingeschränkter Sicht; optische Aufnahmen liefern im beleuchteten Nahbereich Form-, Oberflächen- und Detailinformationen für die abschließende Identifikation. Im hier betrachteten militärischen Minenjagdprozess ist diese abschließende Identifikation optisch abzusichern. Selbst ein hochauflösendes Nahbereichssonar kann den optischen Nachweis daher unterstützen, aber nicht ersetzen.

Abb. 4 veranschaulicht den Unterschied an einer veröffentlichten Manta-Minenform. Die akustische Aufnahme wurde mit einem Synthetic-Aperture-Sonar (SAS) erzeugt. SAS erreicht bekanntermaßen eine besonders hohe und gegenüber einem kompakten mechanisch scannenden Sonar typischerweise deutlich bessere Bildauflösung. Dennoch bleiben im Vergleich zum Kamerabild erhebliche Unterschiede in der unmittelbaren Erkennbarkeit von Form- und Oberflächendetails. Die Abbildung ist weder eine SeaFox-Aufnahme noch ein Leistungsnachweis eines konkreten Systems, sondern eine neutrale Illustration des komplementären Informationsgehalts.

Fazit

Mechanisches Scanning ist nicht allein nach Bildrate, Auflösung oder technologischem Alter zu bewerten. Die Eignung eines Nahbereichssonars ergibt sich aus Umweltbedingungen, Plattformbewegung, Missionsparametern, Integrationsgrenzen und Kosten. Gerade bei einem verbrauchbaren Mine-Disposal-Vehicle kann ein preisgünstigerer Sensor deshalb einen wesentlichen Systemvorteil bieten. Der sequenzielle Bildaufbau macht Fahrzeugbewegung zwar zunächst zur Fehlerquelle; eine zeit- und posebewusste Verarbeitung kann die resultierende Konturverzerrung jedoch gezielt



Abb. 4: Optische und akustische Erscheinung einer Manta-Minenform. Bearbeitete und neu angeordnete Ausschnitte (b) und (f) aus Chinicz und Diamant (2024), Abb. 8; CC BY 4.0; keine SeaFox-Aufnahmen

reduzieren. Werden wiedererkennbare Umweltmerkmale über mehrere Scans verfolgt, entsteht darüber hinaus das Potenzial einer ergänzenden bodenbezogenen Bewegungsbeobachtung, deren Qualität von den zur Vorentzerrung verwendeten Navigations- und Lagedaten abhängt. Die abschließende Identifikation bleibt gleichwohl eine optische Aufgabe. Für den hydrographischen Nahbereich entscheidet somit das abgestimmte Zusammenspiel von Sensor, Zeitbasis, Navigation, Verarbeitung, Plattform und Kamera. //

Literatur

- Burguera, Antoni; Yolanda González; Gabriel Oliver (2012): The UspIC: Performing Scan Matching Localization Using an Imaging Sonar. *Sensors*, DOI: 10.3390/s120607855
- Chinicz, Rebeca; Roe Diamant (2024): A Statistical Evaluation of the Connection between Underwater Optical and Acoustic Images. *Remote Sensing*, DOI: 10.3390/rs16040689
- Hansen, Tim; Bogdan Belenis; Miguel Bande Firvida; Tom Creutz; Andreas Birk (2024): Scanning Sonar Data From an Underwater Robot With Ground Truth Localization. *IEEE Access*, DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3420766
- Höpe, Julian (2025): Realtime Motion Compensation SeaFox Single Beam Sonar Images. Technical Report, Issue 1.00, 30.09.2025, TKMS Atlas Elektronik GmbH
- Mallios, Angelos; Pere Ridao; Emili Hernández; David Ribas; Francesco Maurelli; Yvan Petillot (2009): Pose-based SLAM with probabilistic scan matching algorithm using a mechanical scanned imaging sonar. *OCEANS 2009, Bremen*, DOI: 10.1109/OCEANSE.2009.5278219
- TKMS Group (o. J.): Mine Identification and Disposal System SeaFox. www.tkmsgroup.com/atlas-elektronik/mine-warfare-systems/seafox