

Digitale Signalverarbeitung am, im und unter Wasser

Ulrich Heute

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (DSS/EIT), 24143 Kiel, E-Mail: uh@tf.uni-kiel.de

Zusammenfassung

DAGA in Kiel, Kiel am Meer, Kieler Arbeitsgruppe Digitale Signalverarbeitung – die Suche nach Querverbindungen liegt nahe.

Beim Stichwort Meer denkt man ja vielleicht intuitiv an Rauschen – Rauschreduktion ist ein altes Thema der digitalen Verarbeitung akustischer Signale; verallgemeinert sind die Entstehung und die Bekämpfung von störendem Geräusch oder Lärm ein DAGA-Kern. Auf der Wasseroberfläche machen sich Schiffe – besonders die schnellen – durch Motorengeräusche bemerkbar. Gerade im vermeintlichen „Ort der Stille“ unter Wasser gibt es ebenfalls zahlreiche von Menschen (an sich unbeabsichtigt) verursachte Lärmquellen wie Schiffsschrauben- oder Bohr- und Rammgeräusche bei der Erstellung von Plattformen aller Art, aber auch absichtlich generierte Geräusche wie die „Pings“ von Echoloten oder Sonaren zur Kollisionsvermeidung, dazu mit ähnlichem Zweck erzeugte Laute von Walen und Delphinen, die sich hiermit auch verständigen. Das hat wiederum zu tun mit Unterwasser-Telefonie und akustischer Datenübertragung unter Wasser.

Die Verwendung von „nützlichem Lärm“ zum Schutz von Lebewesen oder Material sowie der Schutz von Lebewesen vor – nützlichem wie nutzlosem – Lärm erfordern Techniken zur Erzeugung und Kontrolle von Signalen, zu ihrer Analyse und deren Auswertung sowie zur Nutzung der so gewonnenen Informationen, die eine – selbstverständlich – digitale Signalverarbeitung voraussetzen.

Anhand dreier maritimer Projekte zum „Schutz vor Lärm“ wie „Lärm zum Schutz“ werden entsprechende Kieler Forschungsarbeiten skizziert.

Einführung

Eine Arbeitsgruppe der Kieler Universität, die sich zentral mit Digitaler Signalverarbeitung (DSV) befasst, wird zwangsläufig (und gern) „Wasserthemen“ aufgreifen. Wenn außerdem Audio- und Sprach-Signalverarbeitung einen Institutskern bilden, wird es sich auch um akustische Fragestellungen mit Wasserbezug handeln.

Unvoreingenommenes Nachdenken über mögliche Stichworte im Zusammenhang mit Kiel, Wasser, Ost- und evtl. auch Nordsee führt vielleicht zunächst auf so etwas wie „Strand“ oder „Fische“ – beides gibt bezüglich „typischer DAGA-Themen“ wenig her: Strandgeräusche wie die durch Wellen oder Badegäste sind teils schön, teils unvermeidlich, Fische scheinen akustisch so uninteressant wie ihre wenig gesprächigen Angler. Einem Techniker fällt dann aber vielleicht in diesem Zusammenhang doch etwas ein, nämlich ein „Fish-finder-Sonar“: Vom Trawler aus werden akustische Impulse ausgesandt, die von Fischschwärmen reflektiert, an

Bord detektiert und zum gezielten Fischfang genutzt werden; Wasserschall und Signalverarbeitung spielen zusammen.

Die Sonar-Idee steckt natürlich auch hinter anderen derartig arbeitenden Geräten, die auf Schiffen zur Ortung, Hinderniswarnung oder generell Gefahrenabwehr dienen; viel früher als die Techniker haben allerdings andere diese Methoden sehr weit entwickelt: Geht man vom Stichwort „Fische“ zu größeren Wassertieren über, so betritt man eine faszinierende Welt voller Wasserschall, nämlich die der Meeressäuger – Robben, Delphine und Wale.

In der Kieler Wasserumgebung erwartet man da wohl eher wenig Spannendes; das stimmt aber nicht (s. z.B. [1]): Seehunde (s. Bild 1) finden sich zahlreich in der dänischen Inselwelt nicht weit nördlich (und erst recht in der Nordsee), sie kommen schon mal aus Neugier in die Kieler Förde, und Kegel- wie Ringel-Robben sind schon vor Rügen und Usedom, erst recht aber zahlreich weiter nordöstlich zu Hause. Ebenso gibt es die größeren Spezies: Kleine Tümmler (s. Bild 2), auch Schweinswale genannt, von denen Tausende in der Nordsee leben (dort bis zu 2 m groß), finden sich in kleinerer (und gefährdeter) Population auch in der Ostsee (hier nur 1.5 m lang), vor allem, aber nicht nur wieder in der „Dänischen Südsee“.



Abbildung 1: Seehunde (© Boris Culik, F³, Heikendorf)



Abbildung 2: Schweinswal (© Boris Culik, F³, Heikendorf)

Der doppelt so lange Große Tümmler, den man mit dem „Typ Flipper“ verbindet, gehört nun tatsächlich nicht in die hiesigen Gewässer; in den letzten Sommern waren aber mehrfach einzelne Exemplare in der Kieler Förde und deren Umgebung, zum Teil verblüffend zutraulich (s. z.B. [3]). Noch überraschender war das Auftreten eines Buckelwals vor Greifswald 2016, eines Pottwals (s. Bild 3) 2004 und 2016 sowie eines Finnwals 2003 vor Kiel und Flensburg. Hier liegt die Vermutung richtig, dass sich die Tiere wohl „verschommen“ haben. Erst recht gilt das, wenn eine Walstrandung zu melden ist.



Abbildung 3: Pottwal (© Boris Culik, F³, Heikendorf)

Genau hier liegt nun tatsächlich ein Akustik-Thema: Alle Meeressäuger *machen* am, im und unter Wasser (z.T. sehr laute!) Geräusche, die sich – je nach Frequenz – sehr weit ausbreiten, und die Tiere *hören* sehr gut – sie können die Akustik deshalb zu verschiedenen Zwecken perfekt nutzen. Robben bellen, grunzen oder knurren, Wale und Delphine klicken, pfeifen, brummen oder „singen“ [3]. Walgesänge wie etwa die von Buckelwalen können einfach ihrer Unterhaltung dienen, i. Allg. geht es aber um sehr praktische Anwendungen: Kommunikation zwischen Tieren, z.B. bei der Partnersuche oder einer Jagdverabredung, Ortung z.B. von Beute oder Hindernissen sowie Orientierung, also z.B. *Vermeidung zu flacher Gewässer*.

Es liegt nahe, zu vermuten, dass bei den erwähnten „falsch geschwommenen“ Exemplaren genau dieses „Meeressäuger-Sonar“ ausgefallen ist – durch Hörschädigung oder durch akute, Nutzsignale verdeckende Störgeräusche. Das aber widerspricht der verbreiteten Annahme, unter Wasser sei doch die „Welt der Stille“.

Unterwasserlärm

Vom Wind verursachte Wellen an der Oberfläche erzeugen im tieferen Wasser ein mehr oder weniger harmloses, gleichförmiges Rauschen. Die Meeressäugerlaute sind erheblich lauter (mit Schalldrücken um 200 dB!). Noch lauter sind allerdings Luft- und Wasserkanonen: Sie werden von Schiffen aus zur Meeresbodenkartierung, vor allem aber bei der Suche nach Bodenschätzen eingesetzt. Sie senden Impulse zum Meeresgrund, deren Reflexionen mit einem geschleppten Hydrophonarray an Bord aufgefangen und ausgewertet werden, und erreichen Pegel von 245 dB im Wasser entsprechend ca. 185 dB in Luft. (Pegel in Wasser sind um ca.

60 dB höher als in Luft. Das liegt zum einen an unterschiedlichen Bezugswerten, nämlich 20 μPa in Luft und 1 μPa in Wasser, zum anderen an der um den Faktor 3700 höheren Impedanz von Wasser.) Die Luft- und Wasserkanonen liegen also weit jenseits der menschlichen, aber eben auch der Meeressäuger-Schmerzschwelle und führen unter Umständen unmittelbar zu Taubheit. Ähnlich laut sind auch die Sonare, die – zivil – zur Hindernisdetektion oder – militärisch – zur Objekterkennung eingesetzt werden, Explosionsgeräusche bei der Sprengung von Wracks und Altmunition oder bei Materialtests, Rammgeräusche bei der Erstellung von Spundwänden oder Offshore-Plattformen, und selbst Schiffsschrauben lärmen erheblich, vor allem durch Kavitation und bei großen Fahrzeugen. Alle diese Störsignale liegen nun leider im Lautstärke- und Frequenzbereich, den auch die Meeressäuger nutzen (s. Bild 4), und sie breiten sich über große Entfernungen aus (extrem tieffrequente Schalle, z.B. von Vulkanausbrüchen oder Atombombentests, sind noch in 6000 km Abstand aufzunehmen). Offenbar besteht ein Lärmschutzbedarf für Meeressäuger.

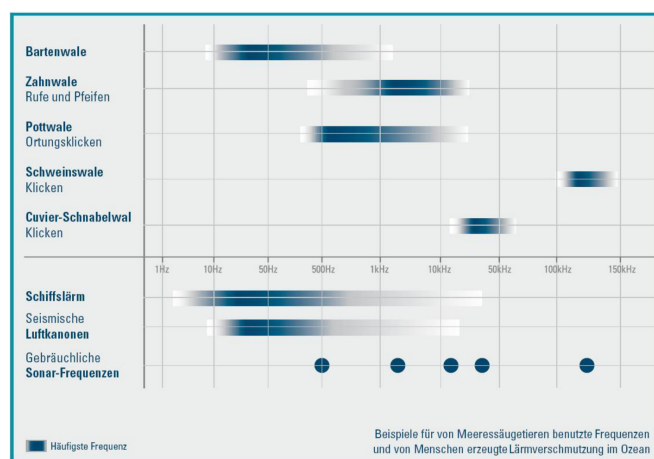


Abbildung 4: Frequenzbereiche von Meeressäuger- und Störsignalen (aus [4])

Lärmmutzung und Lärmvermeidung

Viele der genannten Störquellen sind aus unterschiedlichen Gründen wohl nicht vermeidbar: Schiffe werden noch lange mit Schrauben angetrieben, alte Minen oder Wracks muss man sprengen, um Verkehrswege zu sichern, Schallsondierungen des Meeresgrundes von der Wasseroberfläche aus sind „alternativlos“, Offshore-Anlagen wachsen durchaus sinnvollerweise, Warnungen vor Felsen oder Eisbergen durch zivile, vor Minen und U-Booten durch militärische Sonare müssen genutzt werden.

Allerdings kann man zumindest für eine Milderung sorgen: Wenn bekannt ist, dass in der akustischen Nähe eines „Lärmerzeugers“ gefährdete Tiere erschienen sind, kann man Ramm-, Explosions- oder Schallsonden-Operationen ebenso wie militärische Sonare in Manövern wenigstens kurzzeitig unterbrechen und abwarten, bis die Tiere sich entfernt haben – evtl. beschleunigt durch passende, nicht-schädliche Schalleinwirkung.

Im Weiteren werden Arbeiten der Arbeitsgruppe Digitale Signalverarbeitung und Systemtheorie (DSS) zu diesem Problemkreis skizziert, die zum einen die „Nutzung von Lärm“ zum Schutz von Menschen und Material u. a. durch eine neue Sonartechnik betreffen, zum anderen den „Meeressäugerschutz vor Lärm“ durch Techniken aus der Sprachsignalverarbeitung; kurz eingegangen wird zudem auf Arbeiten eines Kooperationspartners, die auf den „Delphinschutz vor Lärm durch Lärm“ zielen.

PITAS: Piraterie- und Terror-Abwehr auf Seeschiffen

Pitas ist ein Projekt gefördert vom Bundes-Ministerium für Wirtschaft.

Problemstellung

In einer Kooperation von fünf Kieler Industrie- und Wirtschaftsbetrieben, des Forschungsbereichs Wasserschall und Geophysik (FWG-WTD 71) der Bundeswehr und der Technischen Fakultät (TF) der CAU Kiel wurde an einem Multisensorsystem gearbeitet, das die Erkennung von Piraten- und Terrorangriffen auf Seeschiffen bei langsamer Fahrt oder auf Reede verbessern und vor allem die Vorwarnzeit vergrößern soll.

Die Gefährdung geht aus von schnellen, offenen Motorbooten (sog. Skiffs, s. Bild 5) mit einer entschlossenen Piratenbesatzung, die scharfe Waffen, Seile mit Enterhaken oder Enterleitern mitführen. Sie tauchen z.B. unvermittelt in einem Feld harmloser Fischerboote auf, von denen eines (oder auch mehr als eines) gestohlen sein und als Mutterschiff und Versteck dienen mag; auch kann ein solches „harmloses“ Boot Schwimmer oder Taucher absetzen, die in der Dämmerung die Ankerkette emporklettern oder am Rumpf eine Sprengladung anbringen.

Skiffs lassen sich detektieren mit Radar, Kameras, Luftmikrofonen oder passivem Sonar (also Wassermikrofonen), die auf fischerbootfremde Außenborder-Geräusche achten, Schwimmer durch Kameras, Radar, Aktivsonar, Taucher durch Passivsonar, wenn sie mit einem „Scooter“ oder zumindest offener Atemtechnik anschwimmen, sonst nur mit Aktivsonar.

Abbildung 5: Skiff mit Piraten am Horn von Afrika (Oscjje8 bn_ ngarspc _jig_lac)

Alle genannten Ansätze erfordern neu zu entwickelnde Sensoren – eine vorhandene Deckskamera findet keine Schwimmer, das Navigationsradar über der Brücke keine Skiffs, ein Felsenwarnsonar keinen Taucher usw.; darüber hinaus sind die Sensoren zu vernetzen, mit einem gemeinsamen Tracking (d.h. der Verbindung als interessant eingestuft Kontakte zu plausiblen Bewegungsspuren) zu verbinden, das wiederum einer weiteren Plausibilitätsprüfung durch eine permanent selbstlernende Wissensdatenbank unterzogen wird (s. Bild 6).

Letztere wurde im Institut für Informatik der TF entwickelt, ein neuartiges Radarsystem und neuartige Sendesignalformen in zwei Gruppen des Instituts für Elektro- und Informationstechnik der TF, Tracking- und Sonar-Ideen in der Arbeitsgruppe DSS [5, 6]. Kurz berichtet wird im Folgenden über die Arbeiten am Tauchersonar, also über den akustisch interessanten Bereich.

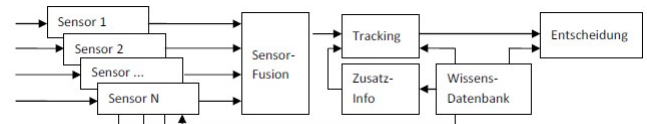


Abbildung 6: Schema des PITAS-Systems

Tauchersonar-Ansätze

Klassische aktive Sonare zielen auf Fischschwärme, Felsen, Eisberge, U-Boote oder zumindest Minen, also relativ große Gebilde mit entsprechend starker Reflexion. Taucher haben eine sehr kleine Rückstreulfläche, insbesondere von vorn, was ein schlechtes Signal-zu-Stör-Geräusches-Verhältnis (SNR) bedingt. Sie schwimmen relativ langsam (< 1 m/s ohne Scooter), weisen deshalb kaum eine Dopplerverschiebung auf, die sie von Festzielen unterscheiden würde, und ihre Geschwindigkeit ist, auch wegen des schlechten SNR, schwer zu messen. Als vielversprechend wurde daher zunächst eine Wasserschallversion des sog. „van-Atta-Arrays“ verfolgt, das für Radaranwendungen vorgeschlagen [7] und realisiert, für Unterwassernutzung vorgeschlagen [8] und für Luftschall gebaut und untersucht [9] wurde.

Van-Atta-Array

Der Ansatz zielt prinzipiell auf ein selbstfokussierendes Array: Nach omnidirektionaler Abstrahlung erfolgt aus einer bestimmten Richtung eine Reflexion, und in genau diese Richtung baut sich allmählich eine verstärkte Abstrahlung auf (s. Bild 7). Bild 8 zeigt, wie eine ebene Welle, die z.B. von links oben einfällt, die Mikro- resp. Hydrophone von links nach rechts mit Vielfachen einer Verzögerung $\Delta \tau \sim \sin \Theta$ erreicht; Bild 9 zeigt, hierauf aufbauend, die Funktionsweise des van-Atta-Arrays in idealisierter Form: Das zuerst erreichte Mikrophon gibt sein Signal über einen Lautsprecher (resp. Sonarsender) in unmittelbarer Nachbarschaft sofort wieder ab. Wenn das zweite Mikrophon erreicht wird, wird es vom zweiten Lautsprecher abgestrahlt, während die erste Abstrahlung bereits eine Strecke $\sim \Delta \tau \sim \sin \Theta$ zurückgelegt hat. Das dritte Mikrophonsignal entsteht wiederum um $\Delta \tau \sim \sin \Theta$ später, und wenn es das entsprechende dritte Sendeelement verlässt, sind die beiden anderen Signale

bereits um Strecken $\sim \Delta \tau \sim \sin \Theta$ bzw. $2 \Delta \tau$ vorausgeilt – usw.: Es entsteht offenbar eine ebene Wellenfront genau in Einfallrichtung, die bei geeigneter Verstärkung anwächst. Aussagen über den Winkel Θ sowie über Entfernung und Doppler werden u. a. durch Korrelationsanalyse (bei geeigneten Sendesignalformen) gewonnen.

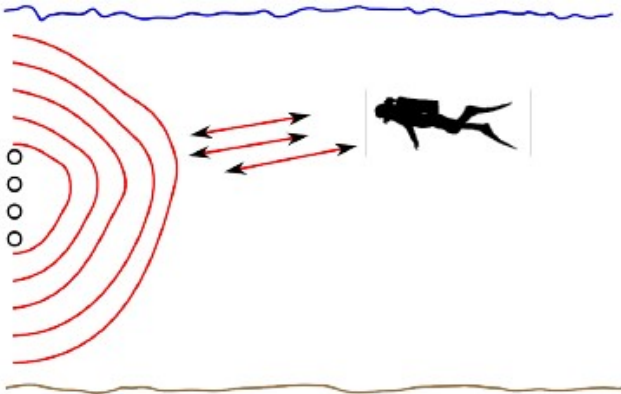


Abbildung 7: Prinzipielle Wirkung des van-Atta-Arrays

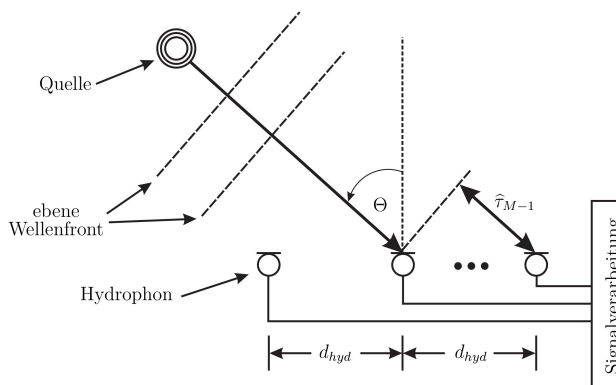


Abbildung 8: Lineares Array mit einfallender ebener Welle [6, S. 52]

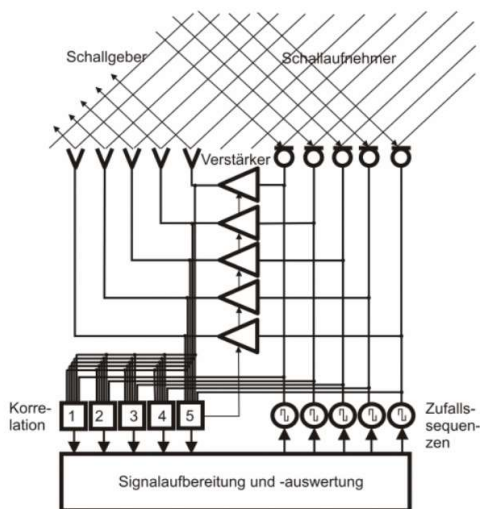


Abbildung 9: Prinzipieller Aufbau des van-Atta-Arrays

Bild 10 gibt den Aufbau einer Luftschall-Version wieder, wie sie von Walther [9] realisiert und vermessen wurde. Mikrophone und Lautsprecher sitzen (hinreichend weit) vor und in den Öffnungen jeweils hintereinander, und die Verbindungen zwischen empfangendem Mikrophon und abstrahlendem Element erfolgt jeweils diagonal in der Fläche.

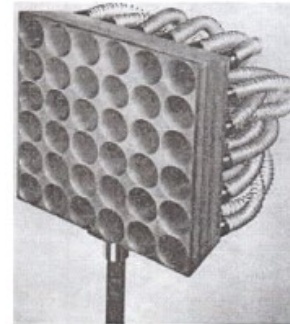


Abbildung 10: Luftschall-Aufbau eines van-Atta-Arrays (aus [9])

Realisierungsprobleme und Lösungen

Während Walther die Funktionsweise in Luft nachweisen konnte und bei Radaranwendungen geradezu sensationelle Anwendungen beschrieben sind [10], zeigten eigene Versuche mit einem Unterwasseraufbau grundsätzliche Probleme: Das Prinzip beruht darauf, dass (fast) zeitgleich empfangen und gesendet wird, und zwar in unmittelbarer Nachbarschaft von Sender und Empfänger. Im Wasser führt das aber zu so starken Einkoppelungen in die Hydrophone, dass der Empfangsteil völlig übersteuert.

van-Atta-Varianten

Ein naheliegender Ausweg besteht darin, Sender und Empfänger abwechselnd in kurzen Zeitabschnitten zu betreiben. Taktet man beide aber einfach im Verhältnis 1:1, so entsteht, wie in Bild 11 zu sehen, ein neues Problem: Angedeutet ist der Zustand am Ende einer Sendeperiode; ein Sendesignal-Block hat den Sender gerade verlassen, weiter weg liegen bereits die Vorgänger. Während nun die Reflexionen der grün gezeichneten Ziele den Empfänger zu Beginn oder während seiner „Öffnung“ erreichen, kommen die Rückstreuungen der roten Ziele gerade an, wenn der Empfänger schließt – es entstehen Detektionslücken in regelmäßigem Abstand, dazwischen Bereiche, in denen Ziele weniger Reflexionen beisteuern.

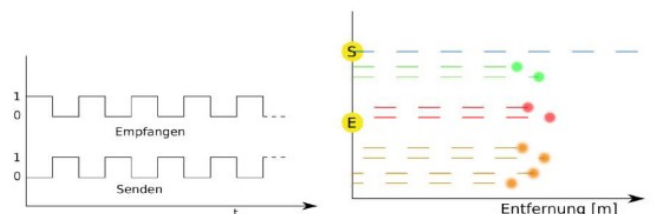


Abbildung 11: Detektionslücken bei gleichmäßiger Sender-Empfänger-Umschaltung

Auch hierfür gibt es einen Ausweg: Man muss nur unregelmäßig takten, wie in Bild 12 angedeutet. Hier ist ein periodisches Muster „von Hand“ eingestellt worden, dass bei fast allen Zielen im Mittel 50% Rückstreuung erreicht. In dieser Form ist das Verfahren patentiert [8]; durch eine Optimierung der Tastfolge wäre zu erreichen, dass wirklich keine Lücken bleiben.

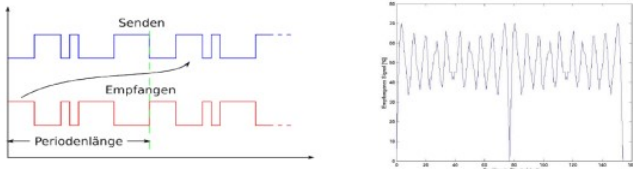


Abbildung 12: Vermeidung von Detektionslücken durch ungleichmäßige Tastung

Empfangs- und Sende-Beamforming

Im Rahmen von PITAS wurde jedoch aus Zeitgründen das van-Atta-Prinzip lediglich mit zunächst klassischem pulsartigem Senden und Beamforming „nachempfunden“. Die in Bild 13 gezeigte Anordnung wäre aber auch für das oben geschilderte Vorgehen geeignet.

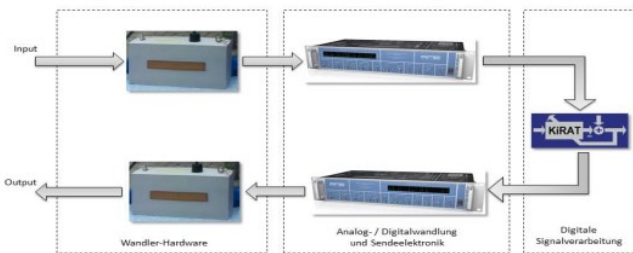


Abbildung 13: Versuchssystem mit Sonarempfänger und Sonarsender (Fa. ELAC Nautik, Kiel; 32 Sende-, 48 Empfangskanäle, je 32 genutzt), Signalaufbereitung und A/D- bzw. D/A-Wandlungen, Realzeit-DSV-System KiRAT der Arbeitsgruppe DSS)

Das erwähnte klassische Beamforming lässt sich für die Empfangsseite anhand von Bild 8 einfach erklären: Durch (digital realisierte) Verzögerung der Mikrophonsignale um passende Vielfache $\tau_v = v \cdot \Delta\tau$ von $\Delta\tau \sim \sin \Theta$ lassen sich die Signale kohärent überlagern, addieren sich also für die Richtung Θ in ihren Amplituden, während sich (unkorrelierte) Störungen nur in ihrer Leistung addieren: Das SNR wächst mit der Zahl der Empfänger. Im sog. Beampattern sieht man die Verstärkung in Blickrichtung und die dazu relative Abschwächung für andere Winkel. Die Form dieses Musters lässt sich darüber hinaus variieren, wenn zusätzlich zu den Laufzeiten Gewichtskoeffizienten g_v genutzt werden; der „Delay-and Sum Beamformer“ wird zum „Filter-and-Sum Beamformer“ (s. Bilder 14 und 15).

Dasselbe Prinzip lässt sich nun auch im Sender anwenden: Bei Vorgabe einer vermuteten Zielrichtung kann man einen verstärkten „Strahl“ physikalisch dorthin senden, indem man die Sendesignale passend verzögert (und ggf. gewichtet). Es ist allerdings anzumerken, dass dann alle anderen

Richtungen weniger „ausgeleuchtet“ werden, schwache Ziele also verlorengehen können, wenn die vermutete Richtung nicht stimmt. Über die PITAS-Projektarbeit hinaus wurde daher das Prinzip „Sende- & Empfangs-Beamforming“ erstens um eine neue Variante bereichert, zweitens um eine „kognitive“ Komponente erweitert.

Kognitives MIMO-Sonar

„Kognitiv“ im PITAS-Konzept ist die selbstlernende Wissensdatenbank: Sie erlaubt eine Verfeinerung oder Veränderung der Auswertungen, indem bereits „gesehene“ Ereignisse mit Momentanbeobachtungen verglichen werden; insbesondere Tracking-Zwischenresultate können so bekräftigt oder herabgestuft werden.

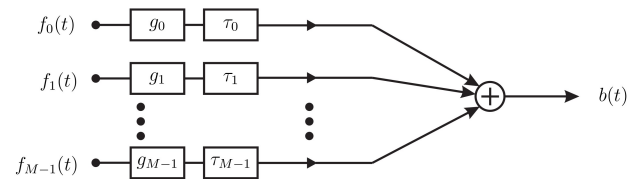


Abbildung 14: Filter- & Sum Beamformer [6, S.58]

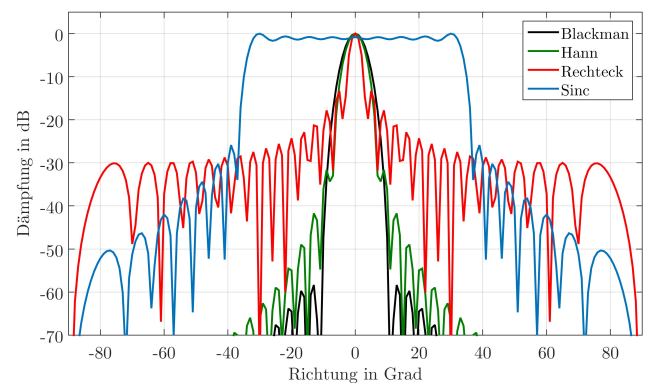


Abbildung 15: Beampattern-Varianten je nach Wahl der Koeffizienten g_v [6, S. 59]

Das Tracking selbst ist aber bereits eine kognitive Komponente: Es wird auf Plausibilität von Kontakten hin geprüft. Diese Information kann ihrerseits in den Sender eingekoppelt werden, damit er bei „wahrscheinlichen“ Zielen ggf. durch Signalvariation genauere Informationen liefert. (Ähnliches machen Fledermäuse, die in der Nähe einer Beute die Puls-Wiederholrate erhöhen.) Hier wurde nun ein vereinfachtes Tracking in den Sender mit eingebaut.

Ein klassisches Sonar (im Weiteren als Single-Input Multiple-Output, SIMO, bezeichnet) verwendet eine einzige Signalform, die für den gerade interessierenden Zweck geeignet ist; sie wird abgestrahlt und in mehreren Empfängern mit Beamforming ausgewertet, wie oben und in Bild 16 links erneut skizziert. Beim MIMO-Prinzip (für Radar eher, im Sonarbereich weniger bekannt) senden mehrere „Lautsprecher“ orthogonale Signale wie etwa Sinussignale in einem Frequenzraster („Frequency-division Multiplex“, FDM-MIMO). Dann erhält jeder einzelne Empfänger diese verschiedenen Anteile (s. Bild 16 rechts), die nach

Modulation auf eine gemeinsame Zwischenfrequenz durch Phasenverschiebungen nachträglich kohärent gemacht werden können und somit Informationen über den sendeseitigen Winkel zum Ziel liefern – ohne durch Richtungsvorgabe schon vorab physikalisch die Zielrichtung festlegen zu müssen wie beim „normalen“ kombinierten Sende- und Empfangsbeamforming.

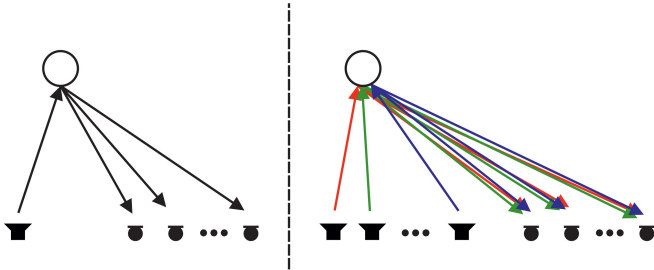


Abbildung 16: „SIMO-“, rechts „MIMO“-Sonar-Prinzip [6, S. 68]

Zusätzlich kann anschließend das übliche Empfangsbeamforming erfolgen. Damit erreicht man als „Beampattern“ insgesamt das Produkt der Muster, die dem Sendearray und dem Empfangsarray entsprechen. Die Gesamt-Arraygeometrie ist daher die Faltung der einzelnen Anordnungen; bei deren geschickter Wahl entsteht eine Richtwirkung, die einem erheblich feineren virtuellen Array entspricht (s. Bild 17).

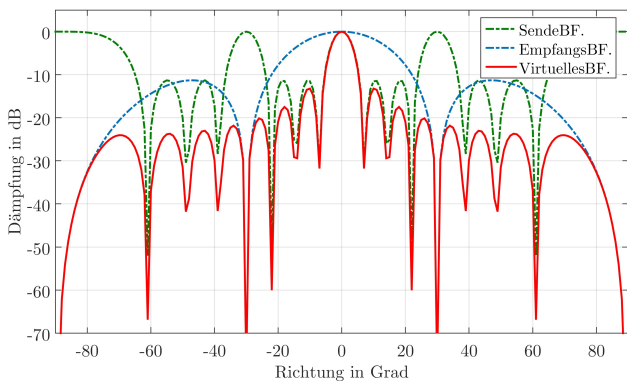


Abbildung 17a: Produkt-Beampattern

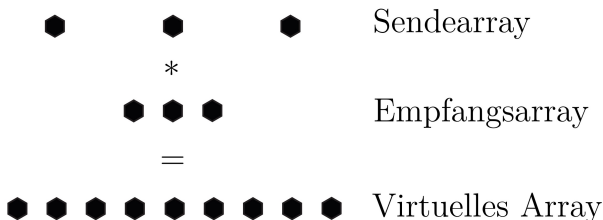


Abbildung 17b: Zu Abbildung 17a gehörige Array-Geometrien [6, S. 76, 77]

Ergebnisse

Ein „Labormuster“ im Container mit klassischem Beamformer-Sonar, neuem Nahbereichsradar, neuen Signalformen, neuer Kamera, neuem Tracking und vollständiger Wissensdatenbank wurde erfolgreich auf einer Mole getestet. Zum kognitiven MIMO-Sonar entstanden nach diesem PITAS-Abschluss Luftschall-Tests und MATLAB-Simulationen, die Erfolg versprechen. In Bild 18 ist ein Vergleich zwischen SIMO-, MIMO- und kognitivem MIMO-Sonar wiedergegeben. Es zeigt sich, dass unter realistischen Annahmen [6] die Entfernung für eine 50%-Detektionswahrscheinlichkeit bei 0°-Richtung von 300 m bei SIMO auf 450 m bei MIMO wächst und dass die kognitive Variante hier sogar noch 100% erreicht. Bei einer Zielentfernung von 300 m liefert SIMO schon bei 10°Zielwinkel nur knapp 50 % Detektionswahrscheinlichkeit, während MIMO noch bei 40° ca. 75 % erreicht und die Kognition hier noch für 100 % sorgt.

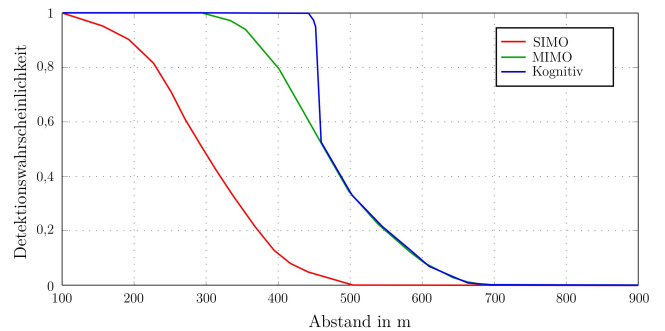


Abbildung 18a: Detektionswahrscheinlichkeit von SIMO-, MIMO- und kognitivem MIMO-Sonar bei 0° Zielwinkel entfernungsabhängig

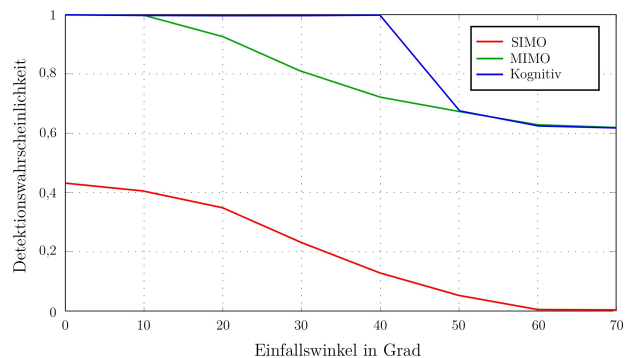


Abbildung 18b: Detektionswahrscheinlichkeit von SIMO-, MIMO- und kognitivem MIMO-Sonar bei 300m Distanz winkelabhängig [6, S. 117, 119]

Meeressäuger-Schutz

Zu der oben erwähnten Annahme „realistischer Bedingungen“ bei der Simulation gehörte die Wahl eines Sendepiegels von 190 dB – das erinnert wieder daran, dass Meeressäuger vor so starkem Schall, wo immer möglich, zu schützen sind. Kurz gezeigt werden soll nun zunächst, dass dieser Schutz selbst „Lärm“ nutzen kann und dass sogar „leise“ Gefahren durch Lärm bekämpft werden können.

Schweinswalschutz durch Lärm

Beim Rammen von Spundwänden entstehen in einem Radius von über 100 m noch Schallpegel von 160 dB, die für Schweinswale gehörschädigend sind. Eine mögliche Dämpfung durch Blasenschleier ist aufwendig. Daher nutzt man eher sog. Pinger – football-große Geräte, die, ins Wasser ausgebracht, für die Tiere unangenehme Töne aussenden. Steigert man ihre Lautstärke vor Beginn der Rammarbeiten allmählich, so lassen sich die Tümmler „vergrämen“: Sie halten sich in hinreichend großer Entfernung von der Quelle auf. Bei längerer Dauer verlassen sie allerdings auch oft endgültig ihr angestammtes „Habitat“.

Dieselben Pinger nutzt man auch zur Abwendung einer „stummen“ Gefahr: Schweinswale verfangen sich leicht in Fischernetzen, die sie nicht sehen und auch nicht akustisch orten können, dazu sind sie zu feinmaschig. Als Nicht-Fische müssen sie aber zum Atmen an die Wasseroberfläche kommen – im Netz ertrinken sie jämmerlich. Hier liegt einer der Gründe für die dezimierten Ostseebestände. Pinger an den Netzkanten vergrämen sie auch hier, wie oben gesagt leider aber u.U. endgültig.

Dieser Effekt lässt sich vermeiden: Einer der PITAS-Partner befasst sich seit langem intensiv mit dem Schutz der Tiere, und er hat herausgefunden, dass man anstelle der unangenehm klingenden Pinger einen „Schweinswal-Wecker“ (Porpoise Alarm, PAL) verwenden sollte, der mittels DSV „in der Sprache der Tümmler“ Aufmerksamkeit weckt [11], ja sogar Neugier, die die Tiere vorsichtig zum Netz schwimmen, die Situation erkennen und die Gefahr vermeiden lässt (siehe Bild 19).



Abbildung 19a: Schweinswal im Netz [12, 13]



Abbildung 19b: PAL-Geräte in ein Fischernetz eingebaut [12, 13]

Meeressäugerschutz vor Lärm

Laute Bauarbeiten lassen sich bei Annäherung von gefährdeten Lebewesen unterbrechen, wenn sie nicht sowieso durch Pinger oder besser PAL-ähnliche Geräte abgesichert wurden. Sonare lassen sich in ihrem eigentlichen Gebrauch – Schutz vor Gefahren aller Art – nicht abschalten, wohl aber militärische Geräte bei Manövern. Das ist schon länger Praxis in europäischen Marineverbänden: An Deck stehen Beobachter mit Fernrohren, unter Deck lauschen Hörer mit Meeressäugerlaut-Expertise und lösen Alarm aus, wenn sich eine Walfluke zeigt oder Kommunikations- und Ortungslaute von Delphinen und Walen zu hören sind. Hierfür wird bei großen Manövern viel geschultes Personal gebraucht, das aber ermüdungs-, wetter- und störungsbedingt keine sehr sicheren Aussagen liefern kann. Eine hochauflösende Infrarot-Kamera mit neuartiger automatischer Bildauswertung auf Fluken und „Blas“ hin [14] verbessert den optischen Zugang, ist aber teuer und bislang nur für Großwale in kalten Gewässern einsetzbar. Unter „Blas“ versteht man die Ausatem-Fontäne von Walen und Delphinen (s. auch Bild 3); sie ist in kalten Gegenden wärmer als die Umgebung und kann dadurch relativ gut erkannt werden.

Im Rahmen eines EDAS-Projekts „PoMM“ (Protection of Marine Mammals) wurde deshalb untersucht, ob man die akustischen Signale nicht automatisch mit Methoden der digitalen Sprechererkennung zur Detektion und Klassifikation von Meeressäugern nutzen kann [15].

Sprechererkennungsansatz

Die Prozedur einer Sprechererkennung wird anhand von Bild 20 erläutert: Im Eingangssignal entdeckt ein Detektor „interessierende“ Passagen. Hieraus werden „Merkmale“ extrahiert, die sich bei verschiedenen Sprechern möglichst stark unterscheiden, für jeden einzelnen aber wenig streuen sollen; hier hilft nötigenfalls eine „Merkmals-Transformation“ nach. Sodann werden die Merkmale mit bereits klassifizierten in möglichst effizienter Weise verglichen und im Ergebnis klassifiziert. Für eine äquivalent funktionierende Meeressäuger-Klassifikation benötigt man

also einen Detektor, geeignete Merkmale, ggf. mit anschließender Transformation (denkbar sind z.B. Principal-Component Analysis (PCA) oder Lineare Diskriminanz-Analyse (LDA)), einen Klassifikationsalgorithmus – und als Basis der Entwicklung schon vor der Anwendung möglichst viele klassifizierte Signale.



Abbildung 20: Prinzipieller Ablauf einer Sprechererkennung [15, S. 31]

Signal-Datenbank

Eine umfangreiche Signalsammlung kam von den Kooperationspartnern in den Niederlanden, in Deutschland, Großbritannien, Italien, Norwegen und Schweden. Allerdings lagen sie in sehr heterogener Form vor mit variierenden Abstraten, Datenformaten, Anwendungs-Hintergründen (Untersuchungen zu Wanderung – Ruhe – Jagd – Paarung...) und Aufnahmetechniken. Hier lag die Arbeit bei der Aussortierung von durch zu schlechtes SNR oder gleichzeitige Laute verschiedener Spezies ungeeigneten Aufzeichnungen sowie der Entstörung, Annotation („labeling“) und Sortierung sowie Vereinheitlichung der Datenformate. Am Ende lag eine Datenbank mit 2078 Ereignissen und 36 Arten vor.

Die scheinbar für eine Auswertung schon ganz brauchbare mittlere Zahl von $2078/36 = 58$ Fällen pro Spezies täuscht jedoch: Pro Art finden sich 1...5...60...600 Aufzeichnungen, also z.T. viel zu kleine Fallzahlen für eine statistische Bewertung. Diese Heterogenität lässt sich durch Bildung von 10 Art- bzw. Laut-Gruppen beheben; so können dann zwar nicht alle Unterarten getrennt werden, wenigstens etwas gröbere Unterscheidungen sind aber möglich.

Detektion

Eine Schätzung von Stör- und Signalleistung, wie sie in Rauschreduktions-Techniken üblich ist, diente sowohl zur Detektion als auch zur Verbesserung durch spektrale Subtraktion.

Merkmale

Wie bei der Sprechererkennung bieten sich Zeitbereichs- sowie Frequenzbereichs-Merkmale an: Man kann den Zeitverlauf auf Dauer, Maximum, Varianz, Symmetrie u.ä. prüfen oder LPC-Koeffizienten berechnen, die dann schon äquivalent zu Frequenzbereichs-Aussagen über die spektrale Einhüllende sind; im Spektrum bieten sich wieder Breite, Maximum, Varianz, Schwerpunkt usw. an, dazu dann die in der Spracherkennung verbreiteten MFCCs („mel-frequency cepstral coefficients“) als ebenfalls zum Spektrum äquivalente Größen. Zudem kann man Laute grob vorklassifizieren, indem man etwa tonale und klickende Signale detektiert und danach unterschiedliche Merkmale auswertet. In [15] finden sich umfangreiche Tabellen möglicher Kenngrößen.

In jedem Fall ist es nötig, aus diesem großen Angebot die relevanten Merkmale zu wählen. Als Kriterium kann man das Verhältnis Q_M der Inter- zur Intra-Klassen-Varianz der (ggf. transformierten) Merkmale heranziehen: Ein Merkmal mit $Q_M \gg 1$ trägt erheblich zur Unterscheidung der Klassen bei, mit $Q_M = 1$ nicht, und mit $Q_M < 1$ führt es zu Fehlansagen.

Eine der Untersuchungsvarianten aus [15] ist in Bild 21 wiedergegeben; ohne im Detail auf die Bedeutung der aufgelisteten Parameter einzugehen, lässt sich sagen, dass es viele unbrauchbare, aber auch etliche gute und z.T. sehr aussagekräftige Merkmale gibt. Am besten eignen sich etwa der Mittelwert der Frequenz f_p mit maximaler Energie und die mittlere Schwerpunkt-Frequenz f_o , ungeeignet ist z.B. die Lage p_h des Zeitsignalhistogramm-Maximums.

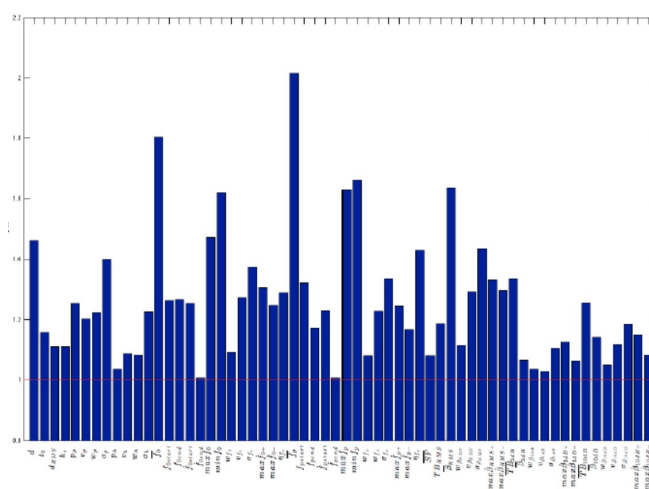


Abbildung 21: Werte des Verhältnisses $Q_M = \text{Interklassenvarianz} / \text{Intra-Klassenvarianz}$ für eine Vielzahl denkbarer Merkmale [15, S. 97]

Klassifikator

Nach dem Vergleich mehrerer Möglichkeiten wurde in [15] ein GMM-Klassifikator („Gaussian-Mixture Model“) mit verschiedenen vielen, unterschiedlichen Komponenten je Art gewählt. Er wurde trainiert und mit unterschiedlich aufgeteilten Trainings- und Testdaten validiert. Eines der Resultate ist der „Verwechslungstabelle“ in Bild 22 zu entnehmen: Lediglich Orcas sind wegen zu geringer Anzahl nutzbarer Daten noch nicht wirklich erfasst. Einige Artengruppen lassen sich ideal trennen, kleine Bartenwale werden gelegentlich für große gehalten, Entenwale mit Delphinen, kleine mit großen Tümmlern verwechselt, im großen Ganzen gelingt aber eine Trennung, die mit Zusatzinformation – etwa über die in einer bestimmten Gegend überhaupt ansässigen Tiere – noch verbessert werden kann. Auch mit im Training noch nicht vorhandenen Daten wurde erfolgreich getestet.

Das in PoMM entwickelte System erwies sich als zu einem älteren („passive acoustic sonar“, PASS-) System in den drei von beiden erfassten Klassen mindestens gleichwertig, in der Zahl erfassbarer Unterscheidungen als überlegen: Ein Einsatz zum Schutz von Meeressäugern vor Sonar-, aber auch Ramm- oder Explosionslärm verspricht Erfolg.

Klassifikationsergebnis										
	1 Large Baleen Whale	2 Small Baleen Whale	3 Beaked Whale	4 Bottlenose Whale	5 Dolphin	6 Porpoise	7 Other Odontocete	10 Seal	87 Killer Whale	99 Sperm Whale
Referenz	306	0	0	0	23	0	8	7	0	0
	102	1660	0	0	46	1	5	9	0	0
	0	0	414	0	48	498	0	0	0	0
	0	0	0	109	45	533	1	0	0	0
	15	6	0	0	683	1	131	18	0	1
	0	0	0	0	4	226	6	0	0	0
	5	0	0	0	21	0	145	2	0	0
	18	0	0	0	27	2	18	580	0	0
	1	0	0	0	2	0	6	0	0	0
	0	0	0	0	5	0	1	5	0	57

Abbildung 22: Verwechslungsmatrix der Meeressäuger-Klassifikation [15, S. 114]

Schlussbemerkungen

In der Arbeitsgruppe DSS der TF wurden und werden auch andere „Wasserthemen“ bearbeitet, teils ebenfalls zu Sonartechniken, teils zu anderen Bereichen wie etwa Analyse von Gasblasen im tiefen Ozean oder Unterwasser-Telephonie. Hierauf konnte aus Umfangsgründen nicht eingegangen werden. Die skizzierten DSS-Arbeiten wurden durchgeführt von Dennis Küter, Tim Claussen und Roman Kreimeyer, von denen auch die meisten Graphiken dieses Berichts beigesteuert wurden. Ihnen gebührt der Dank des Autors, ebenso den Kooperationspartnern der Projekte; stellvertretend seien genannt Michaela Knoll und Ivor Nissen (FWG-WTD 71, Kiel) sowie Boris Culik (Fa.F³, Heikendorf).

Literaturverzeichnis

- [1] NABU Schleswig-Holstein: Schutz unserer Meeressäuger. <https://schleswig-holstein.nabu.de/tiere-und-pflanzen/saeugetiere/meeressaeugetiere/index.html>
- [2] ARD Wissen: Walgesänge aus der Tiefe. http://www.ard.de/home/wissen/Walgesaenge_aus_der_Tiefe/1506292/index.html
- [3] Schleswig-Holsteinischer Zeitungsverlag (sh:z): Großer Tümmler vor Kiel : Wird die Ostsee zum neuen Lebensraum für Delfine? <http://www.shz.de/regionales/kiel/wird-die-ostsee-zum-neuen-lebensraum-fuer-delfine-id14871946.html>
- [4] McKenna, C.: IFAW Ocean-Noise Team: Ocean Noise: Turn it down. [http://www.ifaw.org/sites/default/files/Ocean Noise Pollution Report.pdf](http://www.ifaw.org/sites/default/files/Ocean%20Noise%20Pollution%20Report.pdf)

[5] Nguyen, Viet Duc: Einfluss von Gating-Algorithmen in der Objektverfolgung am Beispiel des Multihypothesentracking. Arb. Dig. Sig.-Verarb., Hrsg. U. Heute, Nr. 41, Diss. TF / CAU Kiel, Shaker-Verlag, Aachen, 2015.

[6] Claussen, Tim: Kognitives MIMO Sonarsystem zur Detektion von Taucherangriffen. Arb. Dig. Sig.-Verarb., Hrsg. U. Heute, Nr. 44, Diss. TF / CAU Kiel, Shaker-Verlag, Aachen, 2017.

[7] van Atta, Lester Clare: Electromagnetic Reflector. U.S. Patent Nr. 2908002, 1955.

[8] van Atta, Lester Clare: Underwater Sound Reflector. U.S. Patent Nr. 2839735, 1955.

[9] Walther, Klaus: Model Experiments with Acoustic van-Atta Reflectors. J. Acoust. Soc. Am. (JASA), vol.34 (1962), S. 665-674.

[10] Brown, Elliot R., Sinclair, Rodney F., Brown, Elayne B.: Retro-Directive Radar for Small-Target Detection. IEEE MTT-S Int. Microwave Sympos., 2007, S. 777-780.

[11] Culik, Boris, v. Dorrien, Christian, Müller, Vaillet, Conrad, Matthias: Synthetic Communication Signals Influence Wild Harbour Porpoise (*Phocoena phocoena*) Behaviour. Bioacoustics, vol. 24 (2015), S. 201–221.

[12] National Geographic: Neues Gerät schützt vor Fischernetzen. 2017; <http://www.nationalgeographic.de/aktuelles/neues-geraet-schuetzt-vor-fischernetzen>

[13] Culik, Boris, Conrad, Matthias, Schaffeld, Tobias, v. Dorrien, Christian, Kindt-Larsen, Lotte: Deploying Porpoise Alerting Device (PALfi) in Baltic and North Sea Gillnet Fisheries. 29th Conference of the European Cetacean Society, Malta, 2015,

[14] Kubny, Heiner: Mit Wärmebild-Kamera auf Walsuche. Polar News, August 2013.

[15] Kreimeyer, Roman: Klassifikation von Meeressäugern mit Mitteln der Spracherkennung. Arb. Dig. Sig.-Verarb., Hrsg. U. Heute, Nr. 43, Diss. TF / CAU Kiel, Shaker-Verlag, Aachen, 2016.