

Dynamische Aspekte beim Schall-empfang im Meer

Jan Abshagen, Ivor Nissen

Der Schallempfang im Meer wird signifikant von dynamischen Prozessen beeinflusst, die für den Empfang von Luftschall häufig keine wesentliche Rolle spielen. Diese Prozesse sind dabei zum einen eng mit der Dynamik des Meeres und zum anderen mit der Bewegung des Schallempfängers im Wasser verbunden. Die Schallgeschwindigkeit im Meer ist nicht homogen und unterliegt einer ausgeprägten räumlichen und zeitlichen Variabilität auf unterschiedlichen Skalen, hervorgerufen durch die zugrundeliegenden strömungsdynamischen Prozesse. Diese Variabilität verursacht Fluktuationen im hydroakustischen Übertragungskanal und kann die Qualität der Signalübertragung auch bei stationärem Schallempfang signifikant reduzieren, was insbesondere für die Unterwasserkommunikation eine große Herausforderung darstellt. Wasserschallempfänger sind zudem häufig an bewegte Plattformen, wie z. B. Schiffe, gebunden, deren Dynamik den Schallempfang zusätzlich beeinträchtigen kann. Dabei limitiert insbesondere das durch die turbulente Umströmung erzeugte Störgeräusch im Inneren des hydroakustischen Empfangssystems, das sogenannte Sonar-Eigenstörgeräusch, die Leistungsfähigkeit und damit die Einsatzmöglichkeiten von plattformgebundenen Wasserschallempfängern. Experimentelle Untersuchungen unter Seebedingungen ermöglichen ein grundlegendes Verständnis der zugrundeliegenden dynamischen Prozesse des Wasserschallempfangs und eröffnen so neue Möglichkeiten im Hinblick auf zukünftige Empfangssysteme und -methoden.

Einleitung

Die Absorptionseigenschaften von Meerwasser verhindern ein signifikantes Eindringen von elektromagnetischer Strahlung in die Ozeane, so dass sich deren technische Nutzung für Unterwasseranwendungen – abgesehen von der Längswellenkommunikation – auf das optische Band und damit auf die mit optischen Signalen maximal erreichbaren Übertragungsreichweiten von wenigen zehn Metern beschränkt. Über größere Distanzen lassen sich Signale im Meer nur durch Schall übertragen, so dass dem Wasserschall eine besondere Bedeutung – sowohl für die Unterwasserkommunikation als auch für die Lokalisierung von Objekten unter Wasser und die

Dynamical Aspects of Underwater Sound Reception

Underwater sound reception is significantly influenced by dynamical processes, which do not play the same prominent role in the reception of airborne sound. On the one hand, these processes are closely related to ocean dynamics and on the other hand to the dynamics of the sound receiver in the water. Sound speed at sea is not homogeneous and displays a substantial spatial and temporal variability on various scales, caused by underlying fluid dynamical processes. The variability causes fluctuations in the hydroacoustical transmission channel and can, even in case of a stationary sound receiver, significantly reduce the quality of sound transmission, which is particularly challenging in underwater communication. Underwater sound receivers are often mounted to moving platforms, such as ships, and so platform-related dynamics further affects the quality of underwater sound reception. In particular, noise induced in the interior of a hydroacoustic antenna by a surrounding turbulent boundary layer due to platform motion limits its performance and therefore possible fields of application. Experimental investigations under sea conditions allow a fundamental understanding of the underlying dynamical processes of underwater sound reception and open new possibilities for future sound receivers and reception methods.

Erfassung der maritimen Umwelt mittels SONAR (SOund Navigation And Ranging) – zukommt [1]. Die Ausbreitung von Wasserschall wird dabei maßgeblich durch die Inhomogenität der Schallgeschwindigkeit im Meer und deren räumlicher und zeitlicher Variabilität bestimmt. Die lokale Schallgeschwindigkeit ergibt sich aus der Temperatur, dem Salzgehalt und dem Druck an einem Ort, wobei die vertikale Variation der Schallgeschwindigkeit aufgrund der Dichteschichtung im Meer typischerweise ausgeprägter ist als die horizontale, so dass dem vertikalen Schallgeschwindigkeitsprofil eine besondere Bedeutung für die Ausbreitung von Wasserschall im Meer zukommt. Insbesondere treten im Meer häufig

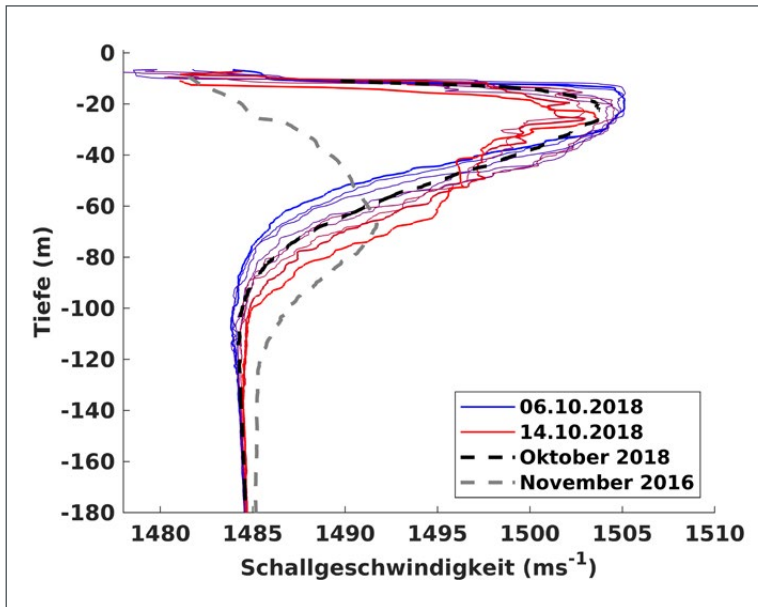


Abb. 1: Variabilität der gemessenen Schallgeschwindigkeit (durchgezogene Linien) bis zu einer Tiefe unterhalb der Sprungschicht im Sognefjord (Norwegen). Die Profile wurden täglich vom 6. (blau) bis zum 14. (rot) Oktober 2018 zur selben Uhrzeit an einer festen Position im Fjord bestimmt. Die Schallgeschwindigkeit nimmt zu größeren Tiefen maßgeblich aufgrund des Druckanstiegs wieder zu und liegt z.B. bei 800 m Tiefe bei ca. 1.494 m/s. Zur Verdeutlichung von Änderungen auf einer größeren Zeitskala ist das mittlere Schallgeschwindigkeitsprofil (grau gestrichelt) aus dem November 2016 im Vergleich zum Mittelwert der dargestellten Profile aus dem Oktober 2018 (schwarz gestrichelt) dargestellt.

Sprungschichten auf, welche überwiegend im Tiefwasser zur Bildung von Schallkanälen führen können. Sprungschichten zeichnen sich durch signifikante Gradienten in der vertikalen Temperatur-, Salzgehalts- oder Dichteverteilung aus. Für jede Aktivität im Bereich der Unterwasserakustik ist die genaue Kenntnis der Schallausbreitungsbedingungen von zentraler Bedeutung [2].

Bedingt durch die strömungsdynamischen Prozesse, die im Meer auf sehr unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Skalen ablaufen, fluktuiert die Schallgeschwindigkeit ebenfalls auf unterschiedlichen Skalen. Exemplarisch ist in Abbildung 1 die typische Variabilität der vertikalen Schallgeschwindigkeitsprofile (durchgezogene Linien) auf einer täglichen Skala im Sognefjord (Norwegen) dargestellt. Änderungen auf einer größeren Zeitskala werden in Abbildung 1 durch zwei mittlere Schallgeschwindigkeitsprofile (gestrichelte Linien) aus unterschiedlichen Monaten verdeutlicht. Diese vertikalen Schallgeschwindigkeitsprofile sind durch langsames Herablassen („Fieren“) der integrierten CTD-Sonden (Conductivity, Temperatur, Depth) des Forschungsschiffs ELISABETH MANN BORGESE vom Institut für Ostseeforschung (IOW) auf einer festen Position im zentralen Bereich des Sognefjords gemessen worden.

Mittels eines numerischen Modells (z. B. MOCASIN) lässt sich aus einem gemessenen vertikalen Schallgeschwindigkeitsprofil die Ausbreitung von Wasserschall über die unterschiedlichen Schallpfade für große Entfernungen von einer Schallquelle berechnen und daraus der Signalüberschuss für eine Übertragung von Wasserschallsignalen bestimmen. In Abbildung 2 ist das Ergebnis einer numerischen Berechnung für eines der in Abbildung 1 dargestellten Profile zu sehen.

Fluktuationen auf deutlich kürzeren Zeitskalen als die in Abbildung 1 dargestellte tägliche Skala werden durch kleinskalige Turbulenz oder (interne) Wellen verursacht und können dazu führen, dass sich der Übertragungskanal für Wasserschallsignale noch innerhalb der Signallaufzeit, sogar im Bereich von Millisekunden, derart ändern kann, so dass eine Übertragung insbesondere von Kommunikationssignalen stark beeinträchtigt wird.

Da der überwiegende Anteil der Aktivitäten im Bereich der Unterwasserakustik plattformgebunden ist, kommt dem Schallempfang [3] mit bewegten Empfängern eine besondere Bedeutung zu. Schallempfänger können dabei direkt in eine bewegte Plattform integriert sein, wie z. B. ein schiffsgebundenes Echolot, oder als abgesetztes Empfangssystem geschleppt werden. Beispiele für geschleppte Systeme sind Schleppantennen („towed arrays“) für die Unterwasserdetektion oder die seismische Exploration sowie Side-Scan Sonare zur Charakterisierung des Meeresbodens. Eine schematische Darstellung einer Schleppantenne findet sich in Abbildung 3. Letztere können auch in sogenannte AUV („Autonomous Underwater Vehicle“) integriert werden. Die plattforminduzierte Dynamik von Wasserschallempfängern verläuft, abgesehen von kurzzeitigen (Schiffs-)Manövern, überwiegend gleichförmig auf festen Kursen mit konstanter Geschwindigkeit, wodurch ein empfangsseitiger multipler Doppler-Effekt beim Schallempfang hinzutritt, der insbesondere für SONAR-Anwendungen von Bedeutung ist.

Durch die relative Bewegung einer hydroakustischen Antenne im Wasser kommt es zusätzlich zur Beeinträchtigung des Schallempfangs durch meeresdynamische Prozesse auch noch zu Einschränkungen, welche durch die turbulente Umströmung der Antenne verursacht werden. Durch die äußere Umströmung entsteht eine turbulente Grenzschicht an der Antennenhülle, die im Inneren ein Störgeräusch, das sogenannte strömungsinduzierte Eigenstörgeräusch, induziert. Aufgrund der ausgeprägten Geschwindigkeitsabhängigkeit von strömungsinduzierten Geräuschen [4] limitiert das (strömungsinduzierte) Eigenstörgeräusch die Leistungsfähigkeit eines hydroakustischen Antennensystems bei höheren

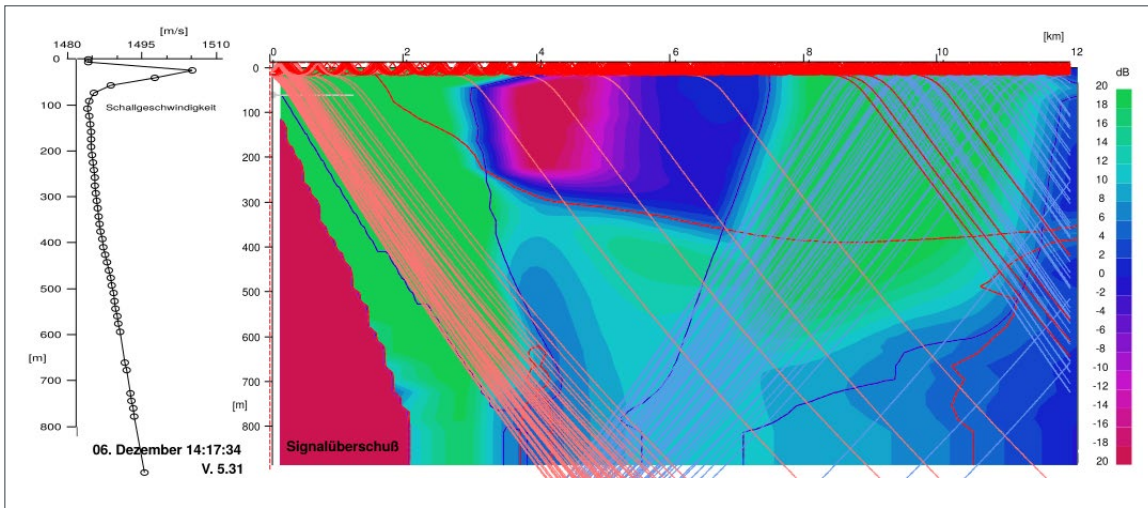


Abb. 2: Modellierung der Signalüberschusssituation im Sognefjord. Der Schall wird von einer getauchten Einheit in 60m Tiefe über zwei Pfadbündel ausgestrahlt, einmal direkt an der Oberfläche und dann parabelförmig durch die Wassersäule zum Empfänger transportiert. Die mittleren Schallgeschwindigkeiten auf den Pfadbündeln unterscheiden sich, grüne Bereiche repräsentieren ein positives Signal-zu-Rauschverhältnis am möglichen Empfängerort über 6 dB, dass Voraussetzung für eine fehlerfreie Dekodierung ist.

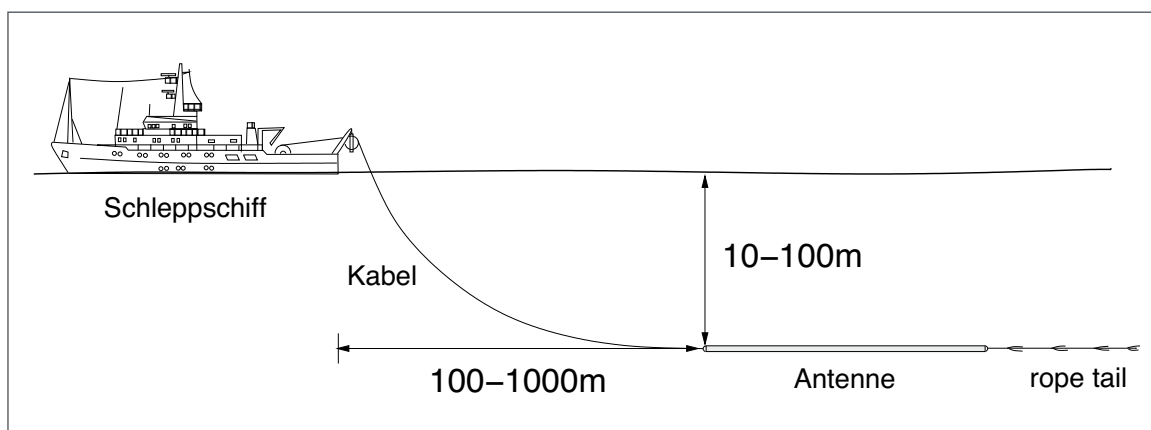
Plattformgeschwindigkeiten und schränkt somit sowohl die Detektionsreichweite als auch die Flächen-suchleistung (höhere Fahrtgeschwindigkeiten ermöglichen höhere Wegstrecken in gleicher Zeit, aber wegen des höheren Störpegels schlechtere Detektionswahrscheinlichkeit und umgekehrt) ein.

Doubly Spread Channels – Effektkompensation bei der Übertragung im Schallkanal

Es überlagern sich also unterschiedliche Effekte im Zusammenspiel von bewegtem Sender, bewegtem Medium und bewegtem Empfänger, die zu unterschiedlichen Signalveränderungen bei der Übertragung im Meer führen. Zur Zeit der Kaiserlichen Marine mit den damaligen Untersuchungen zur Unterwassertelegraphie (U. T.) konnten diese Effekte schwer nachvollzogen werden. Es zeigte sich mit der

zusammenfassenden Darstellung der U. T.-Situation durch die Militärkommandos vom 16. Oktober 1916 und 23. März 1918 [5, Anhang D, Dokument 4], dass damals schon verstanden wurde, dass die Umwelt einen großen Einfluss auf die Empfangsreichweiten hat. Die Vermutung von Materialschwächen der Sendewandler (Lautsprecher unter Wasser) als Grund für den verstümmelten Signalempfang wich langsam der wissenschaftlich korrekten Interpretation von Temperaturschichtungen in der Wassersäule. So wurde zur Kaiserzeit von Herrn Schrader ausgeführt: „Wie sehr ungleichmäßige Wasser-Temperaturschichtungen (von anderen, kaum überbrückbaren Störungen ganz abgesehen) auf die akustische Reichweite von Einfluss sind, erhellt daraus, dass von hier die zuverlässige Reichweite für U. T. für die Praxis auf rund sechs Seemeilen angegeben wird, wäh-

Abb. 3: Schematische Darstellung eines Oberflächenfahrzeuges (Schiff) mit einer linearen Schleppantenne. Abhängig vom Einsatz- und Frequenzbereich kann die Länge einer derartigen, aus einer Vielzahl von Einzelhydrophonen bestehenden Antenne von wenigen Metern bis zu einigen Kilometern variieren.



rend U. T.-Signale unter günstigen Verhältnissen auf etwa 30 Seemeilen wahrgenommen worden sind.“ [5]. Seit den sechziger Jahren gelten die physikalischen Grundlagen als weitestgehend verstanden [1]. Gerade die raumzeitliche Änderung von Druck (über die Wassertiefe), Temperatur und Salzgehalt leitet über die daraus resultierende Schallgeschwindigkeit mittels dem Snelliusschen Brechungsgesetz den Schall, führt mittels Schattenzonen zu abrupten Abnahmen der Detektionsreichweiten, aber auch über Schallkanäle oder Konvergenzzonenausbreitung zu Überreichweiten gegenüber der homogenen Situation eines komplett durchmischten Wasserkörpers wie beispielsweise im winterlichen Flachwasser. Dabei sind es nicht nur Effekte auf größeren Skalen, wie jahreszeitliches Wetter mit Seegang bei Herbststürmen, pH-Wert-Änderungen durch Schmelzwasser oder tagesaktuelles Wetter mit Wellenschlag und dessen Blaseneintrag, internen Wellen, (Gezeiten-) Strömungen, Regen sowie Sonneneinstrahlung (z. B. der sogenannte Afternooneffekt durch Erwärmung der Wasseroberfläche über den Vormittag), sondern die kleinsten Schwankungen der Mehrwegesituation mit konstruktiver und destruktiver Interferenz, die als Wechsel der Ausbreitungspfade die korrekte Erkennung von Sendesignalen am Empfänger stören. Gerade diese kleinskaligen dynamischen Prozesse führen zu den größten Herausforderungen bei einer technischen Nutzung der hydroakustischen Signalübertragung zur Detektion, Navigation und Kommunikation im Grenzbereich. Ob nun beim SONAR zur Echodetektion unter der Umgebungsgrauschgrenze, bei der zur Positionsbestimmung über Multilateration notwendigen Entfernungsschätzung mit unbekannter vom Schall genutzter Pfadlänge und unbekannter vorliegender mittlerer Schallgeschwindigkeit über diesen Weg – beides kann über eine exakt synchronisierte Laufzeitmessung nur zu groben Schätzungen führen – bis hin zur digitalen mobilen Unterwasserkommunikation, die Nachrichten in unterschiedliche Phasenkonstellationen kodiert, obwohl an der unbekannten Meeresbodentopologie oder an der bewegten Wasseroberfläche diese Phasen unbekannt gestreut und damit verfälscht werden und damit dem Empfänger eine Zuordnung zur Umwelt oder zum Sender erschwert wird. Eine In-Situ Unterstützung durch Prognosemodelle, die in den eingesetzten Systemen implementiert sind, scheitert bei den kleinskaligen Prozessen oft an fehlenden Daten über die aktuellen Werte der ozeanographischen und geophysikalischen Größen sowie zu den dynamischen Eigenschaften der Sende- und Empfangssysteme. Aber auch eine kontinuierliche In-Situ-Messung liefert nur beschränkte Unterstützung. Die dynamischen Aspekte beim Schallemp-

fang im Meer stellen heutzutage die größte Herausforderung an die Technologie.

Zur Verdeutlichung diene folgendes Beispiel aus der Kommunikationsthematik: Durch meeresdynamische Prozesse werden ausgesendete Signale durch Mehrwegeeffekte zeitlich diffus am Empfänger überlagert. Durch adaptive Algorithmen und vorher beim Sender eingebrachte Schutzvorkehrungen kann die entstehende Intersymbolinterferenz am Empfänger – also die zeitliche Verschmelzung benachbarter Nachrichtensymbole – gut geschätzt, modelliert und kompensiert werden. Anders verhält es sich bei der diversitären Dopplerausprägung, die im Frequenzbereich zu einem Übersprechen von benachbarten Frequenzbereichen führt. Bei breitbandigeren Anwendungen wie der Unterwasserkommunikation werden dadurch komplexe Signalverzerrungen eingetragen.

Doppler-Effekt bei einer mittleren Schallgeschwindigkeit

Betrachtet man einen Sender S und einen Empfänger R, die sich geradlinig entlang eines Ausbreitungspfad des mit den (projizierten) Geschwindigkeiten $v_s(t)$ respektive $v_r(t)$ fortbewegen, wie in Abbildung 4 skizziert. Ein von S ausgesendetes Signal der Zeitdauer T wird beim Empfänger gestaucht respektive gestreckt und entfernungsunabhängig mit einer Zeitdauer von

$$T' = \frac{\bar{c} - v_s}{\bar{c} - v_r} T$$

wahrgenommen, wobei $\bar{c}$ die durchschnittliche Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium darstellt. Dieses Signal der Zeitdauer T sei als Symbol bezeichnet, zur Vereinfachung wird ein fester Zeitpunkt t für die Geschwindigkeiten angenommen.

- [t = 0] Zum Zeitpunkt t = 0 befinden sich Sender S und Empfänger R im Abstand von |SR| und bewegen sich mit den angegebenen Geschwindigkeiten v_s und v_r fort. S emittiert ein Signal der Zeitdauer T (Symbolanfang).
- [t = τ] Nach der Zeit t = τ trifft das Signal bei R ein und hat eine Strecke von $\tau \bar{c}$ zurückgelegt. Damit gilt

$$|SR| + v_r \tau = \bar{c} \tau \Leftrightarrow \tau = \frac{|SR|}{\bar{c} - v_r}$$
- [t = T] Das Signal wechselt seinen Zustand (Symbolende).
- [t = τ'] Zum Zeitpunkt t = τ' bemerkt R diesen Zustandswechsel. Mittlerweile hat das Signal eine Strecke von $(\tau' - T) \bar{c}$ zurückgelegt. Damit gilt

$$|SR| - v_s T + v_r \tau' = (\tau' - T) \bar{c} \Leftrightarrow \tau' = \frac{|SR|}{\bar{c} - v_r} + \frac{\bar{c} - v_s}{\bar{c} - v_r} T$$

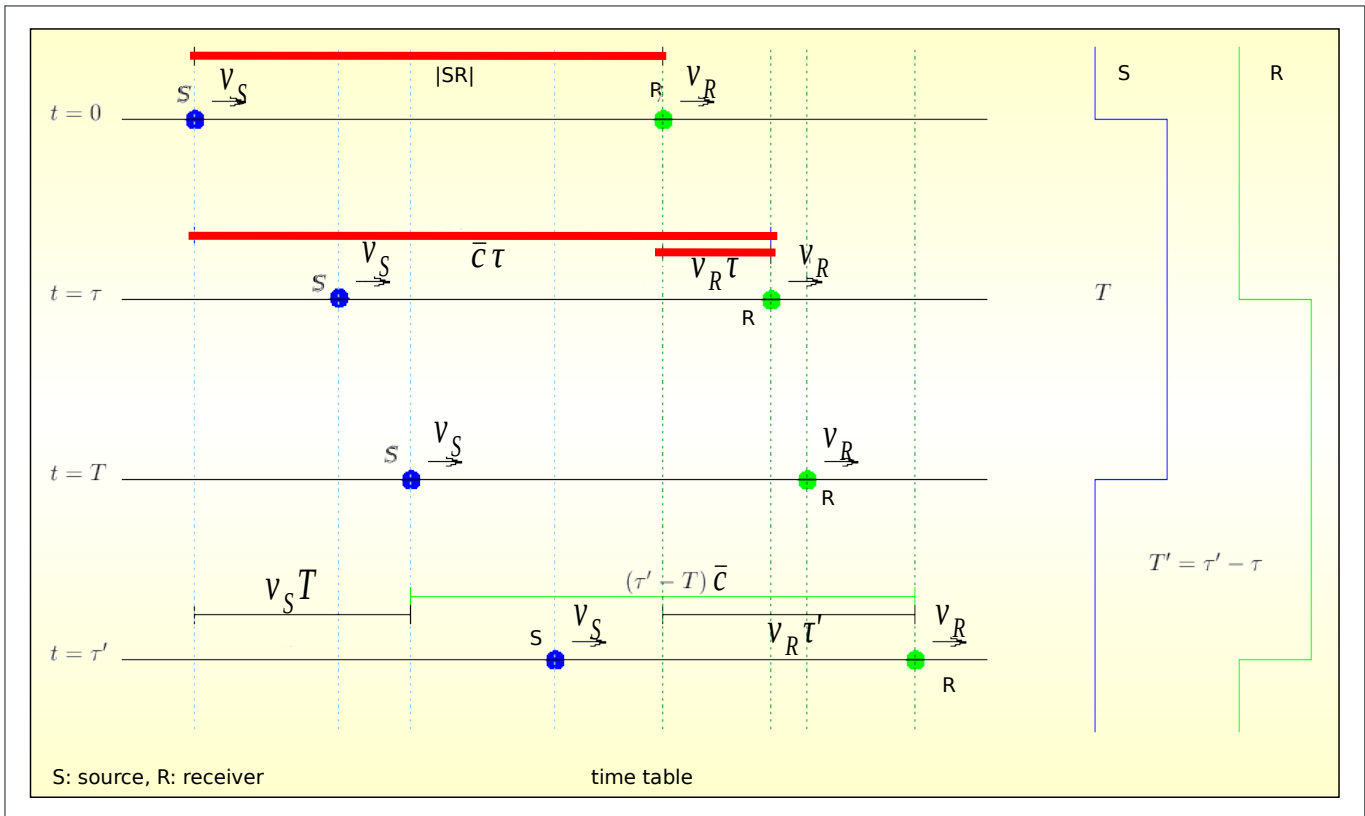


Abb. 4: Doppler-Effekt bei einer konstanten mittleren Schallgeschwindigkeit entlang eines Ausbreitungspfades. Die dargestellten Geschwindigkeiten des Senders und des Empfängers, welche für jeden Pfad unterschiedlich sind, ergeben sich aus der Projektion zwischen Bewegungs- und Ausbreitungsrichtung sowie der lokalen Geschwindigkeit relativ zum Medium.

Die Symboldauer beim Empfänger lässt sich somit angeben zu

$$T' = \tau' - \tau = \frac{\bar{c} - v_S}{\bar{c} - v_R} T.$$

Wenn f die Frequenz des Sendesignales s ist, so ist die Anzahl der Signale in dem Zeitfenster T gleich fT . Da die Signale vom Empfänger R in dem Zeitabschnitt T' beobachtet werden, ist die beobachtete Frequenz damit bekanntlich

$$f' = \frac{fT}{T'} = \frac{\bar{c} - v_R}{\bar{c} - v_S} f = \frac{1 - \frac{v_R}{\bar{c}}}{1 - \frac{v_S}{\bar{c}}}$$

In der Wassersäule variiert die Schallgeschwindigkeit allerdings über unterschiedliche Pfadbündel, wie in Abbildung 2 skizziert; bei der Schallausbreitung überlagern sich damit Symbole unterschiedlicher Längen T' . Technisch kann man durch Resampling – also eine Neuabtastung des Signals – jedoch nur eine Dopplerverschiebung (den Doppler Shift) ausgleichen. Wenn nun das eine Symbol der Länge T beim Empfänger unterschiedlich skaliert, gestreckt und gestaucht mit dem Signal aus anderen Pfaden überlagert eintrifft, dann führt ein einzelnes Resampling zu einer Spreizung bei den anderen und ein sogenannter „Doppler spread“ entsteht. Die Spreizung in der Zeit durch die Mehrwegeausbreitung (delay spread) plus die Spreizung in der Frequenz durch die

dynamischen Prozesse in Form des Doppler spread kombinieren sich zu einem sogenannten „doubly-spread channel“. Dieses kann mathematisch durch die Kanal-Autokorrelation-Funktion beschrieben werden, welche die Variation des Schallkanals in dem Frequenz-Zeit-Ortsraum gut charakterisiert. Visualisierungen dieser komplexen Zusammenhänge (Delay-Doppler-Power-Spectrum) für eine Ausbreitungssituation im Mittelmeer findet man als Filmmaterialbeispiel unter [6].

Im Folgenden wird das Beispiel der Messung aus dem Sognefjord aus Abbildung 1 zur Verdeutlichung des Effekts aufgegriffen und ein Übertragungspfadbündel nahe der Oberfläche (siehe Abb. 2) mit einem parabelförmigen Pfad mit einer um 600 Meter größeren Weglänge im Tiefwasser bei mittleren Schallgeschwindigkeiten von 1.484 m/s kurz unterhalb der Sprungschicht und 1.494 m/s in der Tiefe miteinander verglichen. Befindet sich ein Wasserschallempfänger unmittelbar unterhalb der Sprungschicht, dann kann vereinfacht ein direkter Pfad mit einem festen Abstand zwischen Sender und Empfänger und ein sieben Promille längerer Ausbreitungsweg über den Parabelpfad betrachtet werden. Ein vom Sender abgestrahltes Symbol, welches eine Nachricht tragen kann [6], wird dann fast gleichzeitig am Empfänger über beide Pfade ankommen. Es entsteht

eine Co-Symbol-Interferenz. Zwischen beiden ein-
treffenden Kopien gibt es jedoch einen gravierenden
Unterschied: Beide Empfangskopien sind durch den
Einfluss der durchschnittlichen mittleren Schallge-
schwindigkeiten und dem resultierenden Doppler-
Faktoren unterschiedlich lang, eine (projizierte) Be-
wegung von Sender oder Empfänger vorausgesetzt.
Betrachtet man das Frequenzband von 4 – 8 kHz, ein
Sendeschiff mit zwölf und einem AUV als Empfänger
mit sechs Knoten Fahrtgeschwindigkeit, was unge-
fähr 6 bzw. 3 ms⁽⁻¹⁾ entspricht (bei der ausgeprägten
Sprungschicht zwischen Oberfläche und Wasserkör-
per ist auch das eine Kommunikationsherausforde-
rung), so führt das mit

$$f' = \frac{1484 - 3}{1484 + 6} f = 0,9939 \dots f \neq 0,994 f = \frac{1494 - 3}{1494 + 6} f = f''$$

zu den Empfangsfrequenzbänderabweichungen
[-24,16; -48,32] Hz und [-24; -48] Hz gegenüber
der Ausstrahlung. Jedoch kann man für ein Zeitin-
tervall nur mit einer festgelegten Rate neu abtasten,
so dass zwangsläufig im anderen Band ein Abtastfeh-
ler, hier im Bereich von ca. ¼ Hz, entsteht. In die-
sem idealisierten Beispiel ist der Unterschied nicht
sehr ausgeprägt, vergrößert sich jedoch zusammen
mit anderen dynamischen Prozessen in den Be-

reich von einigen Hertz Bandbreite. Wenn nun das
4-kHz-Frequenzband aus diesem Gedankenbeispiel
bei einem Mehrträgerverfahren in 1.024 Unterträger
zerlegt wird, bei dem in jedem Unterband simultan
Nachrichtenpakete übertragen werden, so kommt
es zum sogenannten Übersprechen – also dem Ver-
schmieren von Bändern. Dieser Effekt kann zumeist
nur durch Schutzintervalle im Frequenzbereich
kompensiert werden, was jedoch Bandbreite für die
Übertragung kostet. Wie viel Schutz benötigt man
nun in einer konkreten Situation in Zeit [im Bereich
von Millisekunden] und Frequenz [im Bereich we-
niger Hertz]? Wie viele Unterbänder darf das Kom-
munikationssystem nutzen, das hauptsächlich wegen
der Nutzung einer schnellen Fourier-Transformation
nur in Zweierpotenzen operiert (Anzahl Träger: 256,
512, 1024, 2048)? Je mehr Unterträger verwendet
werden, desto robuster wird das System gegen Mehr-
wegeausbreitung, jedoch wird es gleichzeitig umso
empfindlicher gegen das Übersprechen. Hier fehlt es
an In-Situ-Modellen und In-Situ-Indikatoren – und
stellt eine Herausforderung für die Zukunft dar [7].
Auch das (strömungsinduzierte) Eigenstörgeräusch
und das räumlich und zeitlich sich ändernde Um-
gebungsgeräusch haben einen starken Einfluss auf
die Qualität der Empfangsstruktur. Gerade wenn

Admonter



Nature's favourite Designer

Raumkonzepte
aus Naturholz
auf Boden,
Wand & Decke

ADMONTAKUSTIK
ERÖFFNET NEUE
MÖGLICHKEITEN DER
AKUSTISCHEN
UND VISUELLEN
RAUMGESTALTUNG.

ACOUSTICS Premium Eiche stone | ©Das Martell | Foto: Daniel Sobietzki

admonter.com

Naturholzböden
Floors

Naturholzplatten
Elements

Naturholz Akustikplatten
Acoustics

Naturholztüren
Doors

Naturholzstiegen
Stairs

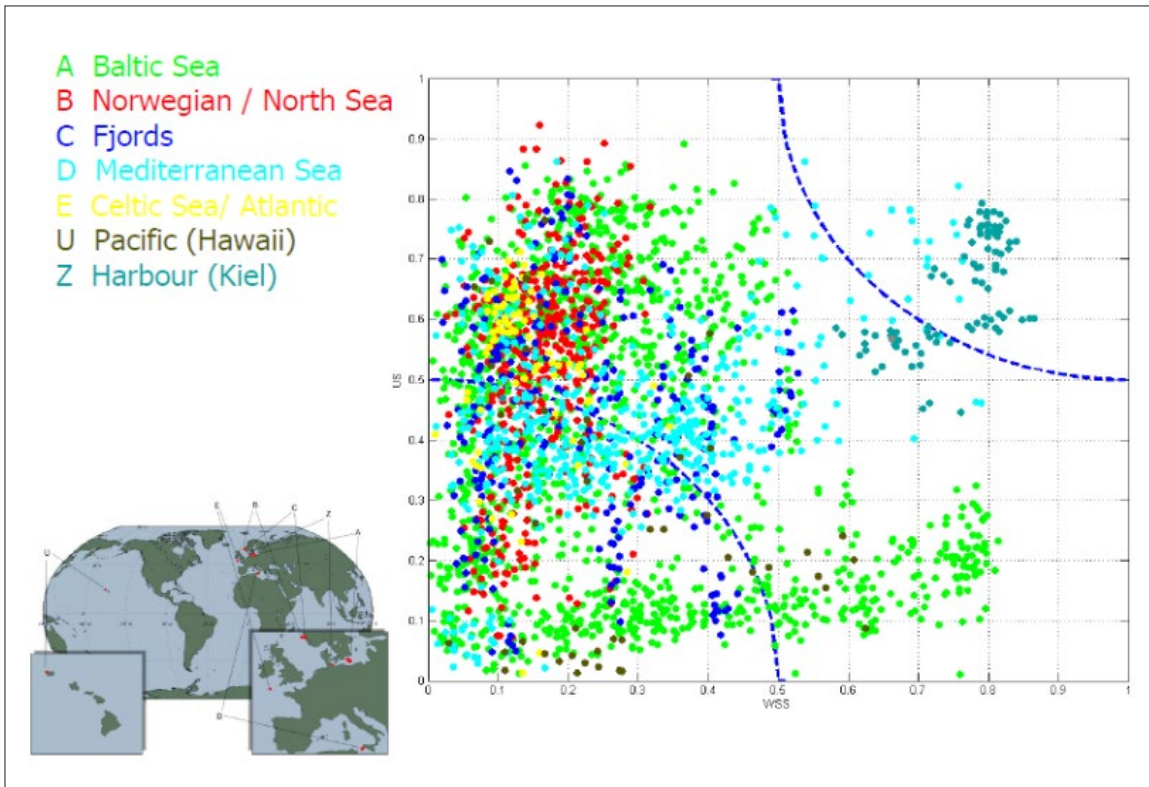


Abb. 5: Messungen im Meer von WSS-US-Paaren aus dem Indikator [7] über alle 30-Sekunden-Archivierungen (über 3000 Beprobungen) der FWG/WTG 71 seit 2001. Paar-Punkte in der linken unteren Ecke erfüllen die Annahme eines WSSUS-Kanals, gegenüber in der rechten oberen Ecke nicht. Auch die Stationarität von Geräuschen (US) trifft oft nicht zu (obere Quadrathälfte).

man umweltschonende, energiearme (Unterwasserkommunikations-)verfahren nutzen möchte, bei denen beim Empfänger nur wenig Energie über den Rauschgrenzen liegt, wird aktuelles Kanalwissen notwendig. So hat das im obigen Gedankenbeispiel eingeführte Schiff einen höheren Eigenstörpegel als das AUV, kann daher Nachrichten nicht so gut empfangen, beide haben eine unterschiedliche Empfangssituation, bei der sonst immer angenommenen Kommutativität zwischen Sender und Empfänger!

In-Situ-Kanalvermessungen

Zur In-Situ-Kanalvermessung werden vom Sender in den Nachrichtenstrom sogenannte Piloten eingebracht, dem Kommunikationspartner bekannte Signalkonstellationen, an denen der Empfänger erkennt, welche Änderungen auf dem Übertragungsweg durch den Sender (als Nachricht) und welche durch die Umweltbedingungen hervorgerufen worden sind. Die Anzahl dieser Piloten muss an die dynamische Ausbreitungssituation kanalangepasst stets optimiert werden. Meistens wird jedes Datenunterband durch ein oder zwei Pilotenunterbänder flankiert, was zu einer Halbierung respektive Drittelung des Transferolumens führt. Blinde Ansätze, die die Pilotenanzahl stark minimieren respektive ohne Piloten auskommen, sind auf eine statistische Beschreibung des

Übertragungsverhaltens durch die mathematische Formulierung der oben angeführten Kanal-Autokorrelationsfunktion angewiesen. Das im Mobilfunk bei Standardsituationen (keine Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge) gern genutzte WSS-US-Modell (wide-sense stationary uncorrelated scattering) fasst beide Bereiche zusammen, erwartet aber im Beobachtungszeitraum eines Symbols (Symbolzeit) die Stationarität im weitesten Sinne und gleichzeitig die Unkorreliertheit der Streukomponenten. Es stellt sich die Frage, ob aufgrund der dynamischen Prozesse im Meer diese Voraussetzung überhaupt gegeben sind? Hochgenaue Messungen zur Phasenschwankung haben gezeigt (Abb. 5), dass in vielen Einsatzsituationen auf See weder ein stationäres farbiges Rauschen fester Flanken oder eine Stationarität innerhalb der Symbolzeit oder beides vorliegt. Stationarität bezüglich der Zeit und Stationarität bezüglich der Frequenz – also der Bewegung – ist in dynamischen Systemen nicht grundsätzlich zu unterstellen. Die Kenntnis einer der vier Charakterisierungen a) Verzögerungs- oder b) Doppler-Kreuzleistungsdichtespektrum, c) Zeit-Frequenzkorrelations- oder d) Streufunktion reicht somit nicht aus, um jeweils die drei anderen Charakterisierungen daraus berechnen zu können – es liegt keine Vertauschbarkeit der zugehörigen Integrale und damit von Zeit und Frequenz

in den Berechnungen vor. Empfängerkonzepte können nicht vom Mobilfunk auf Unterwasseranwendungen übertragen werden, die physikalischen Größenordnungen der relevanten dynamischen Prozesse sind tatsächlich andere [5, 6, 7].

Wie lässt sich nun In-Situ bestimmen, welches Modell in der Empfängerstruktur und damit welche statistische Verteilung vorliegt? In vorbereitenden Arbeiten, die in [7] weitergeführt worden sind, wurden erste Schritte unternommen, um einen 2-bit-Indikator [WSS, US] zu implementieren, der dem Empfänger zu verbesserten Dekodier-Ergebnissen verhelfen soll. Das Verständnis des Zusammenspiels von Bewegung von Sender, Empfänger und Medium über die Zeit und damit vom wichtigen Frequenz-Zeit-Produkt ist jedoch noch unvollständig.

Strömungsinduziertes Eigenstörgeräusch

Bei Bewegung einer Sensorplattform im Wasser entstehen durch die Umströmung turbulente Druckfluktuationen in der unmittelbaren Umgebung der Sensoren. Diese dynamischen Prozesse spielen für die Qualität des Schallempfangs eine zentrale Rolle. Allgemein umfasst das Eigenstörgeräusch einer hydroakustischen Antenne alle Störgeräusche, die ihren Ursprung nicht im Wasserschall haben, sofern dieser nicht unmittelbar durch die Sensorplattform selbst erzeugt wird [1]. Die nicht aus dem Nahbereich der Sensorplattform stammenden Geräuschbeiträge, die z. B. durch Wind, Regen oder auch (entfernten) Schiffsverkehr erzeugt werden, bilden zusammen das Umgebungsgeräusch im Meer, welches sowohl von den Umweltbedingungen als auch vom Seegebiet abhängt [8]. Da das aus entfernten Quellen stammende Umgebungsgeräusch nicht ursächlich mit der Sensorplattform verbunden ist, kann es auch nicht durch Bauart oder Betrieb der hydroakustischen Antenne beeinflusst werden. Daher wird der Einfluss des Eigenstörgeräusches auf die Leistungsfähigkeit einer hydroakustischen Antenne unabhängig von den anderen, meeresspezifischen Störeinflüssen, wie dem Umgebungsgeräusch und, bei aktiven Systemen, auch dem Nachhall, betrachtet.

Wesentliche Beiträge zum Eigenstörgeräusch können bei plattformgebundenen Wasserschallempfängern von den Geräuscherzeugern der Sensorplattform selbst, wie z. B. vom Fahrmotor eines Schiffes, verursacht werden, sofern der Störschall über einen Körperschall- oder plattformnahen Wasserschallpfad in die Antenne einkoppeln kann. Diese plattformspezifischen Beiträge zum Eigenstörgeräusch sind bei einem abgesetzten Empfangssystem, wie z. B. einer Schleppantenne, gegenüber einem plattformgebundenen signifikant reduziert, wodurch ins-

besondere im schiffsakustisch relevanten Frequenzbereich ein verbessertes Empfangsverhalten erreicht werden kann. Dem steht allerdings auch ein höherer technischer Aufwand beim Einsatz von geschleppten Systemen unter Seebedingungen entgegen.

Die Fahrtgeschwindigkeit ist für den Einsatz von bewegten Empfangssystemen ein wesentlicher Parameter, da für viele Anwendungen eine Abwägung zwischen Detektionsleistung, maßgeblich bestimmt durch das Eigenstörgeräusch, und Flächensuchleistung getroffen werden muss [1]. Je nach Bauart und Einsatzzweck einer hydroakustischen Antenne gibt es unterschiedliche Geräuschbeiträge, die bei bewegten Schallempfängern je nach Fahrtgeschwindigkeit unterschiedlich zum Eigenstörgeräusch beitragen. Dieses hat z. B. in der Unterwasserkommunikation zur Folge, dass bei der Verwendung unterschiedlicher Sensorplattformen, wie z. B. von Schiffen und AUV, unterschiedliche, plattformspezifische Eigenstörpegel die Kommunikation zwischen den Sensorplattformen beeinträchtigen können.

Abgesehen von möglichen Geräuschbeiträgen bei hohen Plattformgeschwindigkeiten durch Kavitation an (Schiffs-)Propellern steigt der von der Sensorplattform herrührende Beitrag zum Eigenstörpegel zwar moderat mit der Fahrgeschwindigkeit an, ist aber in der Regel bei anwendungsrelevanten Geschwindigkeiten, bis auf linienartige Beiträge, nicht das dominante Störgeräusch. Strömungsinduzierte Geräusche, die durch die turbulente Umströmung der Antennenhülle induziert werden, spielen hier eine zentrale Rolle.

Strömungsinduzierte Innengeräusche

Die Hydrophone im Inneren einer hydroakustischen Antenne sind typischerweise von einer elastischen Hülle umgeben, die mit einer (ruhenden) Flüssigkeit gefüllt ist. Bei Schleppantennen wird als Füllung häufig ein Öl verwendet, während die Hülle eines plattformgebundenen Empfangssystems meist mit Wasser hinterlegt ist. Hydrophone können für manche Anwendungen aber auch in einem akustisch (nahezu) transparenten Festkörper eingegossen werden, was eine kompakte Bauweise ermöglicht, aber in der Regel auch höhere Eigenstörpegel mit sich bringt. Durch die Umströmung der Antennenhülle bei einem bewegten Empfangssystem bildet sich bei anwendungsrelevanten Plattformgeschwindigkeiten eine turbulente Grenzschicht an der Hüllenaußenseite aus. Dabei regen die turbulenten Wanddruckschwankungen die elastische Hülle an, die ihrerseits bei einer, mit einem Fluid hinterlegten Antenne auf der Innenseite hydroakustischen (Nahfeld-)Schall erzeugt. Dieses Innenraumgeräusch am Ort des Hydrophons bildet den strömungsinduzierten Beitrag zum Eigenstörge-

räusch. Dabei weist der Spektralpegel des strömungsinduzierten Störgeräusches am Hydrophon die für strömungsakustische Geräusche typische, ausgeprägte Zunahme mit der (äußeren) Strömungsgeschwindigkeit auf, so dass das strömungsinduzierte Eigenstörgeräusch zu höheren Fahrtstufen hin den Störpegel am Hydrophon dominiert und die Leistungsfähigkeit des hydroakustischen Empfangssystems begrenzt.

In Abbildung 6 ist ein Wellenzahl-Frequenzspektrum dargestellt, welches den Einfluss des strömungsinduzierten Eigenstörgeräusches auf die Leistungsfähigkeit einer Linearantenne verdeutlicht [9]. In dieser Darstellung des Spektrums, dass mittels 2D-Fourier-Transformation berechnet wurde, ist die projizierte Schallgeschwindigkeit entlang geraden, vom Nullpunkt ausgehenden Linien konstant. Jede dieser Linien entspricht dabei einer horizontalen Ausbreitungsrichtung von Wasserschall, sofern sie innerhalb des durch die Dispersionsrelation von Wasserschall begrenzten, dreieckförmigen Bereichs (weiße Linien) liegt.

Im Wellenzahl-Frequenzspektrum können auch andere physikalische Prozesse entsprechend ihrer Dispersionsrelation Pegelbeiträge liefern. Ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit des jeweiligen Prozesses kleiner als die von Wasserschall, so liegt der spektrale Beitrag in einem Wellenzahlbereich ober- bzw. unterhalb (je nach Ausbreitungsrichtung) des dreieckförmigen Wasserschallbereichs.

Exemplarisch lässt sich in Abbildung 6 im Frequenzbereich oberhalb von 2 kHz eine Geräuschspur eines entfernten Schiffes (blaue gestichelte Linie) erkennen, während unterhalb von 2 kHz breitbandige Geräuschbeiträge die Wasserschallspur im Spektrum überlagern. Der spektrale Beitrag dieses Störgeräusches spiegelt dabei die charakteristischen Dispersionsseigenschaften von Biegewellen wider. Die Anregung von Biegewellen durch eine turbulente äußere Grenzschicht führt bei dieser Antenne, deren Hydrophone in einem Festkörper vergossen sind, zu einem sehr hohen Eigenstörpegel im unteren Frequenzbereich, so dass praktische Einsatzmöglichkeiten dieses Empfangssystems auf den höheren Frequenzbereich beschränkt sind.

Strömungsakustische Experimente unter Seebedingungen

Aufgrund der Bedeutung des strömungsinduzierten Eigenstörpegels für die Leistungsfähigkeit eines hydroakustischen Empfangssystems, ist es wichtig, die physikalischen Prozesse der (strömungsinduzierten) Schallentstehung unter Wasser besser zu verstehen, aber auch Erkenntnisse über das zu erwartende Eigenstörgeräusch in einer frühen Phase eines Antennendesigns zu erlangen. Strömungsakustische

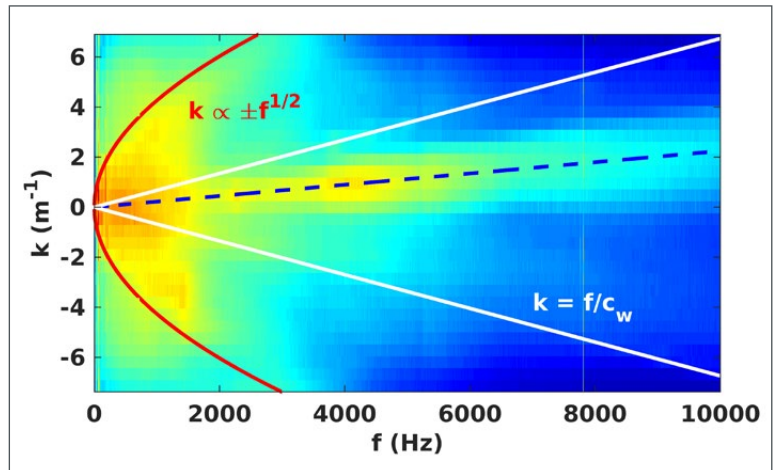


Abb. 6: Wellenzahl-Frequenzspektrum bestimmt mit einer Linearantenne bestehend aus 30 in einem Abstand von 7 cm äquidistant angeordneten Hydrophonen bei einer Schleppgeschwindigkeit von $5,7 \text{ ms}^{-1}$. Im unteren Frequenzbereich wird der Spektralpegel durch das strömungsinduzierte Geräusch, das durch turbulente Anregung von Biegewellen entsteht, dominiert. In diesem Frequenzbereich ist der Schallempfang durch das strömungsinduzierte Eigenstörgeräusch limitiert.

Experimente unter Seebedingungen ermöglichen grundlegende physikalische Untersuchungen zum strömungsinduzierten Eigenstörgeräusch in genau dem spezifischen akustischen und ozeanographischen Umfeld im Meer, welches auch für anwendungsnahe Fragestellungen relevant ist.

In Abbildung 7 ist das strömungsakustische Messsystem FLAME (Flow Noise Analysis and Measurement Equipment) [9] während eines Einholvorganges am Ende eines Schleppexperiments mit den Forschungs-

Abb. 7: FS ELISABETH MANN BORGESE (IOW, Warnemünde) beim Einholen des FLAME-Schleppkörpers (Flow-Noise Analysis and Measurement Equipment) während einer Forschungsfahrt in den Sognefjord, Norwegen. Im Vordergrund erkennt man den FLAME Schleppkörper (gelb) mit der integrierten Linearantenne (grau), mit der das Wellenzahl-Frequenzspektrum in Abbildung 6 bestimmt wurde. Auf der gegenüberliegenden Seite vom Schleppkörper befindet sich die Messkonfiguration (vgl. Abb. 8).



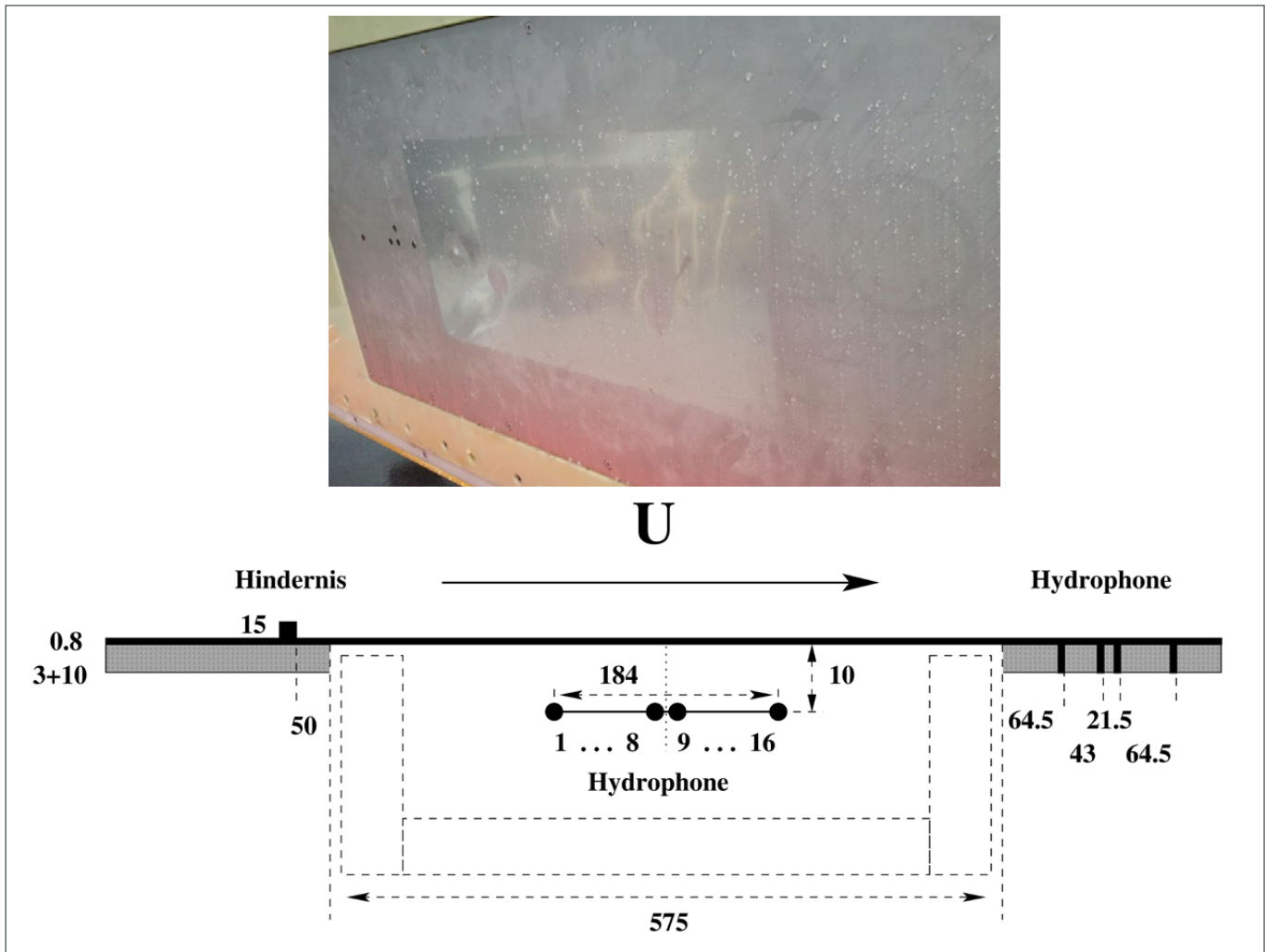


Abb. 8: Messplatte mit rechteckigem Messfenster und nicht-äquidistanten, stromabwärts hinter der Messplatte angeordneten wandbündigen Hydrophonen. Wegen der inhomogenen Plattendicken ist das Messfenster nach einem Schwimmtest sichtbar. Vor einer Messung werden die im Bild sichtbaren Zwischenräume und Kavitäten geglättet (oben). Messanordnung mit einem quaderförmigen Hindernis stromaufwärts vom Messbereich. Die turbulenten Wanddruckschwankungen werden stromabwärts vom Messfenster mittels wandbündiger Hydrophone vom Typ RESON 4050 und das Eigenstörgeräusch unterhalb der Platte mit einem Lineararray aus 16 äquidistant angeordneten Hydrophonen vom Typ RESON 4013 gemessen (unten).

schiff ELISABETH MANN BORGESE (IOW) im Sognefjord, Norwegen, zu sehen. Der Schleppkörper wurde während einer einzelnen Messung dieses Experimentes auf geradem Kurs in einem Abstand zwischen 400 m und 800 m hinter dem Forschungsschiff auf einer Tiefe unterhalb von 90 m, d.h. unterhalb der lokalen Sprungschicht im Fjord (vgl. Abb. 1), geschleppt. Der große Abstand zwischen Schleppkörper und -schiff reduziert den Eintrag vom Störschall in das Messsystem hinreichend stark. Die Experimente auf großer Tiefe durchzuführen, hat insbesondere aber vibroakustische und nicht zuletzt auch hydrodynamische Gründe. Die Wasserschicht unterhalb der Sprungschicht zeigt nur eine geringe Variabilität, was ein ruhiges Laufverhalten ermöglicht und den Einfluss der Einstromturbulenz minimiert. Das System ist dabei hydrodynamisch derart ausgelegt, dass keine Flossenstabilisierung während einer Messung not-

wendig ist, so dass keine zusätzlichen Störgeräusche während einer Messung vorhanden sind.

Mit dem FLAME-Schleppkörpersystem lässt sich die strömungsakustische Schallentstehung auf der Innenseite einer von außen turbulent angeregten (ebenen) Platten im Geschwindigkeitsbereich zwischen 2 ms^{-1} und 7 ms^{-1} systematisch untersuchen [10]. Das System ermöglicht die Untersuchung sehr unterschiedlicher Plattenkonfigurationen, die jeweils vor einem Experiment präpariert und in den FLAME-Schleppkörper integriert werden. Als Beispiel für eine derartige Messkonfiguration mit einem linear elastischen Material ist in Abbildung 8 (oben) eine Messplatte aus Stahl zu erkennen.

Der relevante Messbereich ist auf ein rechteckiges Fenster (575 mm x 300 mm) innerhalb der Plattenkonfiguration beschränkt, hinter dem auf der Innenseite eine Kavität mit einem Hydrophonarray

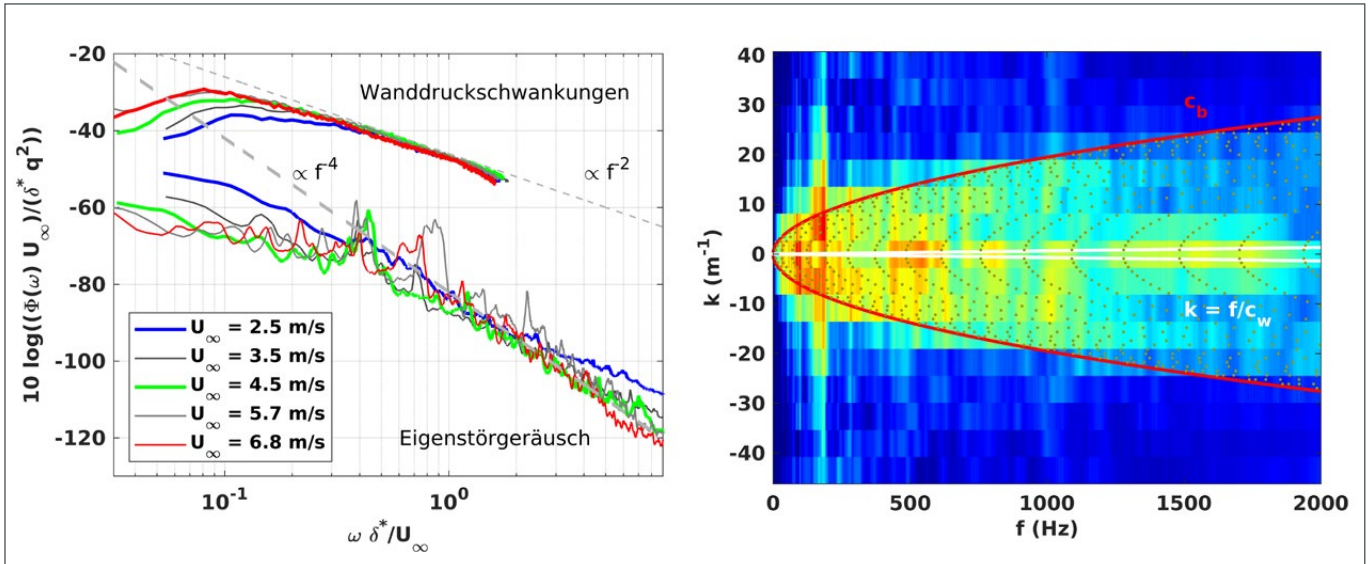


Abb. 9: Strömung über ein Hindernis: Vergleich der spektralen Leistungsdichte der turbulenten Wanddruckschwankungen ($\omega \omega^{(-2)}$) und des strömungsinduzierten Eigenstörgeräusches ($\omega \omega^{(-4)}$). Spektrale Leistungsdichte $\Phi(\omega)$ und Frequenz ω sind unter Verwendung der Verdrängungsdicke δ^* , des dynamischen Drucks q und der äußeren Geschwindigkeit U_∞ dimensionslos dargestellt (links), normiertes Wellenzahl-Frequenzspektrum der Innenraumgeräusche mit Dispersionsrelation von Biegewellen und Position von diskreten Biegemoden (rechts).

für die Innenraumschallmessungen positioniert ist. Die turbulenten Wanddruckschwankungen der äußeren Grenzschichtströmung werden hingegen auf der Plattenaußenseite mit mehreren Hydrophonen gemessen, so dass sowohl die turbulente Anregung als auch der erzeugte Innenraumschall gleichzeitig erfasst werden. Eine schematische Darstellung des strömungsakustischen Messaufbaus ist in Abbildung 8 (unten) zu sehen. Durch das Aufbringen einer dünnen Stahlplatte (0.8 mm Dicke) auf eine bedämpfte, ebene Stahlstruktur mit rechteckiger Aussparung ergeben sich für den (rechteckigen) Messbereich sowohl definierte akustische als auch glatte hydrodynamische Randbedingungen. Exemplarisch sind in Abbildung 9 (links) mehrere Spektren der turbulenten Wanddruckschwankungen und des Innengeräusches skaliert dargestellt. Die Spektren stammen aus einer Untersuchung zum Einfluss von Hindernissen in der Grenzschichtströmung auf die Schallentstehung im Innenbereich. Als Skalierungsfaktoren wurden hier die Verdrängungsdicke δ^* , der dynamische Druck q und die äußere Geschwindigkeit U_∞ der ungestörten turbulenten Grenzschicht verwendet. Andere Skalierungen mittels der Grenzschichtdicke δ oder der Impulsverlustdicke θ wären ebenfalls möglich. Bei einem quaderförmigen Hindernis, wie es in Abbildung 8 schematisch dargestellt ist, separiert die turbulente Grenzschicht am Hindernis und legt sich in einem gewissen Abstand vom Hindernis wieder an [11]. Der beobachtete quadratische Abfall in den Spektren der turbulenten Wanddruckschwankungen stimmt dabei gut mit den

Ergebnissen aus Laboruntersuchungen überein [12]. Der wesentliche Schallentstehungsmechanismus im Inneren ergibt sich durch die turbulente Anregung von Biegewellen, was sich auch im spektralen Abfall in den Spektren des Eigenstörgeräusches widerspiegelt. Der spektrale Beitrag, der durch die turbulente Grenzschicht angeregten Biegewellen, ist deutlich im Wellenzahl-Frequenzdiagramm in Abbildung 9 (rechts) zu erkennen.

Strömungsakustische Experimente unter Seebedingungen, wie mit dem FLAME-Schleppkörper [9, 10], ermöglichen ein besseres Verständnis der grundlegenden physikalischen Prozesse, können aber auch konkrete Erkenntnisse zu anwendungsrelevanten Fragestellungen liefern. Die Charakterisierung des strömungsinduzierten Eigenstörgeräusches mittels statistischer Größen, wie der spektralen Leistungsdichte, stellt für viele strömungsakustische Fragestellungen eine hinreichende Beschreibung dar. Um den Einfluss der turbulenzinduzierten Druckfluktuationen auf die Unterwasserkommunikation vollständig zu erfassen, wird in Zukunft aber ein besseres Verständnis der instantanen Dynamik notwendig werden.

Diskussion

Dynamische Prozesse sind für den Empfang von Wasserschallsignalen von großer Bedeutung. Dabei stellen sowohl die raumzeitlichen Fluktuationen im Unterwasserschallkanal, aufgrund der Dynamik des Meeres, als auch die durch die Bewegung der Sensorplattform erzeugten (strömungsinduzierten) Störge-

räusche eine große Herausforderung dar.

Trotz der signifikanten Fortschritte im Bereich der numerischen Simulation von strömungsakustischen Schallentstehungsprozessen im Wasser [13, 14, 15], werden Experimente unter Seebedingungen für die Untersuchung des strömungsinduzierten Eigenstörgeräusches von bewegten hydroakustischen Sensorsystemen nicht zuletzt wegen der Komplexität der turbulenten Dynamik auch in Zukunft unverzichtbar bleiben. Neben der statistischen Charakterisierung des strömungsinduzierten Eigenstörgeräusches wird zukünftig auch, unterstützt durch aktuelle Entwicklungen im Bereich der Wasserschallsensoren, das Verständnis der instantanen Dynamik, wie sie unter anderem für die Unterwasserkommunikation wichtig ist, immer mehr in den Fokus rücken.

Systeme für die Unterwasserkommunikation müssen zukünftig in die Lage versetzt werden, die Größenordnungen der Fluktuationen im hydroakustischen Übertragungskanal zu schätzen und die Kanalparameter mittels a priori und a posteriori Wissen anzugeben, um sich über in-situ-Messungen und adaptiver Signalverarbeitung an den Schallkanal anzupassen. Angepasste „small data“-Strategien erscheinen hier vielversprechender zu sein als „big data“ im Zusammenspiel mit Computerintelligenz, aber in jedem Fall bedarf es eines tieferen Verständnisses der kleinskaligen Turbulenzprozesse und somit auch weiterer experimenteller Untersuchung zur Hydroakustik im Meer.

Literatur

- [1] Urick, R.J.: Principles of Underwater Sound (2nd ed.). McGraw-Hill, New York, 1975.
- [2] Medwin, H.; Clay, C. S.: Fundamentals of Acoustical Oceanography. Academic Press, San Diego, 1998.
- [3] Abshagen, J.: Wasserschallmessungen. In: M. Möser. (Hrsg.), Fachwissen Technische Akustik, Springer, 2018.
- [4] Ciappi, E.; De Rosa, S.; Franco, F.; Guyader, J. L.; Hambric, S. A.; Chi Kin Leung, R.; Hanford, A. D. (Hrsg.): Flinovia – Flow Induced Noise and Vibration Issues and Aspects II. Springer, Cham, 2019.
- [5] Nissen, I.: Wer hat die Gertrude erfunden? WTD71-Report. 2016.
- [6] <https://www.researchgate.net/project/Lecture-Notes-for-Underwater-Communication>
(Filmmaterial UWC-Lecture-0{4,5} D{04,20}a {TimeEvolution, DelayDoppler} HYD{1,128} BPSK PN1 {Surface,Bottom} Data beschrieben auf Seite 109/161 im ersten Teil der Vorlesung „Adaptive Systems for Mobile Underwater Communications with a P(oste)riori Channel Knowledge, Lecture Notes, first part“)
- [7] Kochanska, I.; Nissen, I.; Marszal, J.: A method for testing the wide-sense stationary uncorrelated scattering assumption fulfillment for an underwater acoustic channel. The Journal of the Acoustical Society of America. 143. EL116-EL120. 10.1121/1.5023834. 2018.
- [8] Carey, W.M.; Evans, R. B.: Ocean Ambient Noise: Measurement and Theory, Springer, New York, 2011.
- [9] Abshagen, J.; Nejedl, V.: Towed body measurements of flow noise from a turbulent boundary layer under sea conditions. J. Acoust. Soc. Am. 135., pp. 637–645, 2014.
- [10] Abshagen, J.; Küter, D.; Nejedl, V.: Turbulent flow noise generation under sea conditions. In: E. Ciappi, S. De Rosa,

F. Franco, J. L. Guyader, and S. A. Hambric (eds.): Flinovia – Flow Induced Noise and Vibration Issues and Aspects. Springer, Cham, 2015.

- [11] Schäfer, F.; Müller, S.; Uffinger, Th.; Becker, S.; Grabinger, J.; Kaltenbacher, M.: Fluid-Structure-Acoustic Interaction of the Flow past a Thin Flexible Structure. AIAA Journal – AIAA J. 48., pp. 738–748. 10.2514/1.40344. 2010.
- [12] Camussi, R.; Felli, M.; Pereira, F.; Aloisio, G.; Di Marco, A.: Statistical properties of wall pressure fluctuations over a forward-facing step. Physics of Fluids 20, 075113, 2008.
- [13] Springer, M.: Fluid-Structure-Acoustics Interaction of Turbulent Wall-Bounded Flows. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), 2018.
- [14] Henke, Ch.: Flow noise in planar sonar applications. Journal of Fluids and Structures 78, pp. 263–276, 2018.
- [15] Wachter, F.; Metelkin, A.; Jovanović, J.; Praß, J.; Becker, S.: Numerical investigation of the effect of convex transverse curvature and concave grooves on the turbulent boundary layer along a cylinder in axial flow. International Journal of Heat and Fluid Flow 92, Art.Nr.: 108855, 2021. ■

Dr. Jan Abshagen
Wehrtechnische
Dienststelle für
Schiffe und Mari-
newaffen, Maritime
Technologie und
Forschung (WTD
71), Kiel

Dr. Ivor Nissen
Wehrtechnische
Dienststelle für
Schiffe und Mari-
newaffen, Maritime
Technologie und
Forschung (WTD
71), Kiel