

Nachhallmessungen in einem Schallkanal im norwegischen Sognefjord

Jan Abshagen, Volkmar Nejedl

Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen, Maritime Technologie und Forschung (WTD71)

24340 Eckernförde, Deutschland, Email: janabshagen@bundeswehr.org

Einleitung

Wasserschallmessungen können durch eine Vielzahl von Geräuschen gestört werden [1]. Zum Störgeräuschpegel trägt neben dem Eigenstörgeräusch am Empfänger [2, 3, 4] auch das Umgebungsgeschall im Meer [5], welches z.B. durch Wind, Regen oder Schiffsverkehr verursacht wird, bei. Bei aktiven Sonaren wird die Detektionsleistung hingegen häufig durch den Nachhall limitiert [6]. Der Nachhallpegel resultiert aus einer Überlagerung des rückgesteuerten Schalls eines emittierten Sendesignals vom Meeresboden, von der Meeresoberfläche sowie von Streukörpern, wie z.B. Gasblasen, innerhalb der Wassersäule [7]. Der jeweilige Anteil von Boden-, Oberflächen- und Volumennachhall am Nachhallpegel ergibt sich dabei aus den Gegebenheiten des Seegebietes sowie den Send- und Empfangsparametern.

In einem räumlich begrenzten Seegebiet, wie einem Fjord, kommt es nach der Emission eines Sendesignals zusätzlich noch zu einem (Stör-)Geräuschbeitrag durch Reflexionen an den begrenzenden Wänden [8]. In dieser Arbeit werden experimentelle Untersuchungen zum Nachhall im norwegischen Sognefjord vorgestellt. Die Wände dieses tiefen Fjordes bestehen aus festem Gestein mit einer hohen spezifischen akustischen Impedanz. Die Messungen wurden in einem Schallkanal unterhalb der Thermokline mit einem Kreisarray [9] durchgeführt. Diese Messanordnung erlaubt die Identifikation von direkten Wandreflexionen im Nachhall. Schallkanäle sind für Sonar-Anwendungen wegen des geringen Ausbreitungsverlustes von großer Bedeutung [8].

Experiment

Das Experiment wurde im Juni 2019 mit dem Forschungsschiff Elisabeth Mann Borgese des Instituts für Ostseeforschung (IOW, Warnemünde) im zentralen Bereich des norwegischen Sognefjords, südlich des Høyanger-Fjords, durchgeführt. Ein zylindrischer Sendewandler wurde vom Schiff, welches sich während der Messungen stationär positionierte, auf eine Tiefe von 76 m abgehängt. Wegen des Tidenstroms wurde ein Abstand von ungefähr einer nautischen Meile (1,852 km) zwischen Sender und der frei driftenden Empfangsboje gewählt.

Das Empfangssystem besteht aus einer Oberflächenboje mit Kommunikationseinheit sowie dem Kreisarray, welches von dieser auf 80 m Tiefe abgehängt wird. Das horizontal ausgerichtete Kreisarray mit einem Radius von $r = 1$ m ist in Abb. 1 (a) beim Ausbringen zu sehen. Die azimutale Winkeldifferenz zwischen jeweils zwei der insgesamt 18 Hydrophone beträgt $\Delta\phi = 20^\circ$, d.h. es handelt

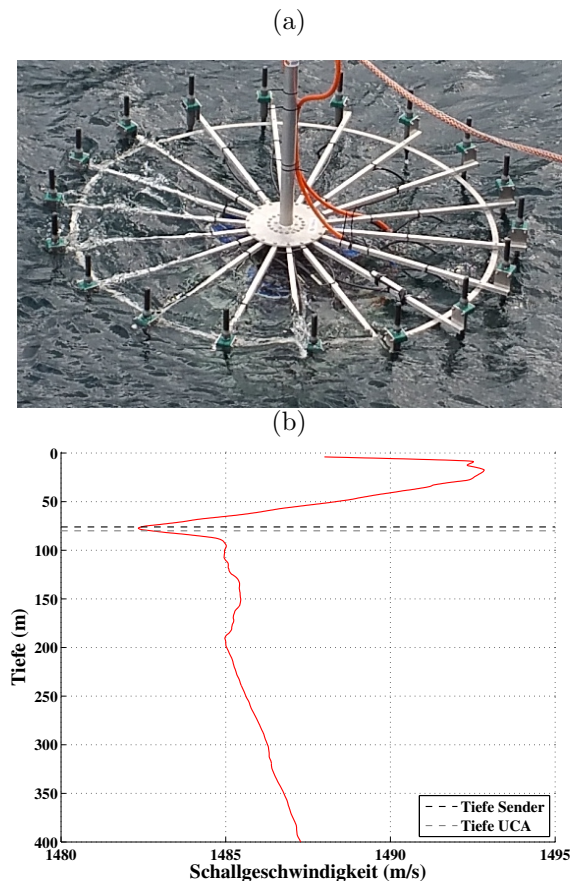


Abbildung 1: (a) Kreisarray (uniform circular array, UCA) mit 18 Hydrophonen und einem Radius von $r = 1$ m (beim Ausbringen von FS Elisabeth Mann Borgese im Sognefjord, Norwegen, im Juni 2019), (b) vertikales Profil (geglättet) der Schallgeschwindigkeit mit Tiefenmarkierung für Kreisarray und Sender unmittelbar vor der Nachhallmessung.

sich um ein gleichförmiges Kreisarray (uniform circular array, UCA).

Das vertikale Schallgeschwindigkeitsprofil, welches in Abb. 1 (b) dargestellt ist, gibt Aufschluss über die Schallausbreitungsbedingungen im Messgebiet. Das Profil wurde unmittelbar vor den Nachhallmessungen mit der bordeigenen CTD-Sonde von FS Elisabeth Mann Borgese bestimmt. Sender und Kreisarray (UCA) waren bei den Messungen unterhalb der Thermokline des Sognefjords in einem Schallkanal positioniert. Die jeweiligen Positionen, die im Bereich des Profilminimums bei $c_{\min} = 1482,7 \text{ ms}^{-1}$ liegen, sind in Abb. 1 (b) eingezeichnet.

Für die Nachhallmessung wurden zwei unterschiedliche Sendesignale verwendet, ein LFM-Puls (linear frequency

modulation) und ein CW-Puls (continuous wave). Der CW-Puls hat ein Frequenz von $f_{cw} = 2$ kHz und eine Dauer von $T_{cw} = 50$ ms, während der LFM-Puls, der als *down-sweep* ausgesendet wurde, eine Mittenfrequenz von $f_0 = 2$ kHz, eine Bandbreite von $\Delta f = 2,5$ kHz und eine Dauer von $T_{lfm} = 1$ s besitzt. Die Abtastrate des Empfangssystems beträgt $f_s = 50$ kHz.

Direkte Reflexionen

Das horizontale Kreisarray erlaubt eine azimutale Richtungsbildung und somit die Identifikation von direkten Reflexionen von den Wänden des Sognefjords.

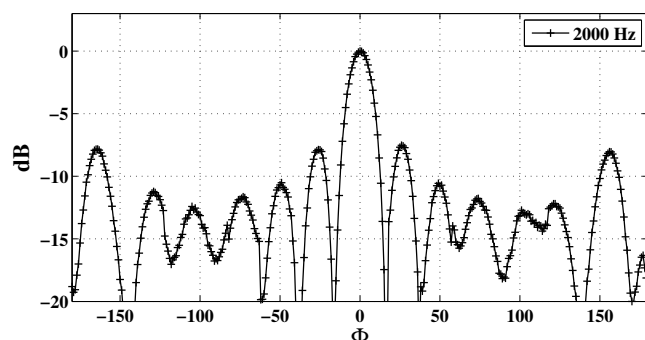


Abbildung 2: Richtcharakteristik des Delay-and-Sum-Beamformers bei $f = 2$ kHz, experimentell bestimmt mit einem CW-Puls mit einer Pulsdauer von $T_{cw} = 50$ ms.

Für die Richtungsbildung wird ein Delay-and-Sum-Beamformer verwendet, wobei sich die Zeitverzögerung $\tau_i = r \cdot \cos(\phi_i)/c$ für das i -te Hydrophon unmittelbar aus der Kreisgeometrie und der Lage der Hauptkeule des Beamformers ergibt. Die Richtcharakteristik des Beamformers für $f = 2$ kHz ist Abb. 2 mit einer Auflösung von $\Delta\phi = 1^\circ$ dargestellt. Das Maximum der ersten Nebenkeule liegt bei $-7,8$ dB. Experimentell wurde die Richtcharakteristik in Abb. 2 aus dem richtungsabhängigen Spektralpegel des CW-Pulses bestimmt.

Abb. 3 (a) zeigt den zeitlichen Verlauf des richtungsabhängigen Spektralpegels nach Aussenden des LFM-Pulses. Der Zeitpunkt $t = 0$ s entspricht dabei dem Ankunftszeitpunkt des Pulses am Empfänger. Der Verlauf ist mit einer zeitlichen Auflösung von $\Delta t = 50$ ms, was einer Analysebandbreite von $\Delta f = 20$ Hz entspricht, aus nicht-überlappenden Zeitabschnitten mittels Kurzzeitspektralanalyse bestimmt worden. Die Darstellung in Abb. 3 (a) gibt den über ein Frequenzband von $\Delta f = 1$ kHz Bandbreite gemittelten Spektralpegel für jede Richtung ($\Delta\phi = 1^\circ$) wieder. Die untere Frequenz des Teilbandes liegt bei $f_u = 2$ kHz und die obere bei $f_o = 3$ kHz. Die Beschränkung der Analyse auf ein Teilband des LFM-Pulses führt zu einem wegen der Sendercharakteristik zu einem besseren Signal-zu-Rausch-Verhältnis und zum anderen erlaubt die damit verbundene Verkürzung der effektiven Pulsdauer auf $T_{eff} = 400$ ms eine zeitliche Trennung zwischen direktem Puls und erster Reflexion.

Zum Zeitpunkt $t = 0$ s erkennt man den Beginn des di-

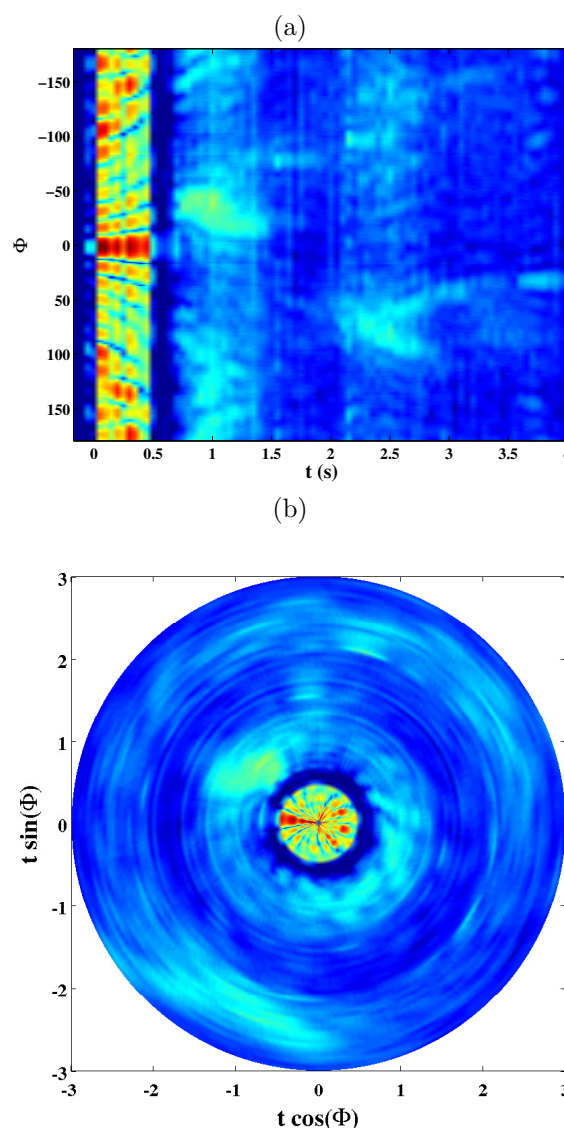


Abbildung 3: (a) Zeitlicher Verlauf des mittleren Spektralpegels im Frequenzband $f = [2, 3]$ kHz in Abhängigkeit vom Azimutwinkel ϕ . Der LFM-Puls trifft zum Zeitpunkt $t = 0$ s am Empfänger ein. (b) Polardarstellung des zeitlichen Verlaufs des richtungsabhängigen Spektralpegels (Verlauf radial von innen nach außen, Beginn bei $t = 0$ s)

rekten LFM-Pulses und die Richtcharakteristik des Beamformers. Die erste Reflexion tritt nach ungefähr 0,7 s auf, gefolgt von einer zweiten nach ungefähr 2,1 s. Beide Reflexionen kommen aus anderen Richtungen als der direkte Puls. Um dieses Verhalten zu verdeutlichen, ist in Abb. 3 (b) der zeitliche Verlauf aus (a) in einer Polardarstellung zu sehen. Im Unterschied zu (a) beginnt hier der Zeitverlauf bei $t = 0$ s, was dem Mittelpunkt des Kreises entspricht, und entwickelt sich für jeden Winkel ϕ in radialer Richtung nach außen. In dieser Darstellung sind die beiden Reflexionen deutlich zu erkennen.

Nachhall im Fjord

In Abb. 4 ist der (relative) Spektralpegel des LFM-Pulses in dem untersuchten Frequenzband sowie der Nachhall zu sehen. Die Zeitreihe ergibt sich aus der Mittelung

des richtungsabhängigen Spektralpegels aus Abb. 3 (a) über den Azimutwinkel ϕ . Zum Zeitpunkt $t = 0$ s ist der Beginn des LFM-Pulses zu erkennen. Aufgrund der effektiven Pulsdauer von 400 ms ist dieser zeitlich deutlich getrennt vom Eintreffen der ersten Reflexion. Beide Reflexionen, die durch Beamforming identifiziert werden konnten, lassen sich auch in Abb. 4 erkennen. Der Nachhallpegel sinkt nach dem Eintreffen der direkten Reflexionen kontinuierlich ab, bis er unterhalb des Umgebungsgeräuschpegels liegt.

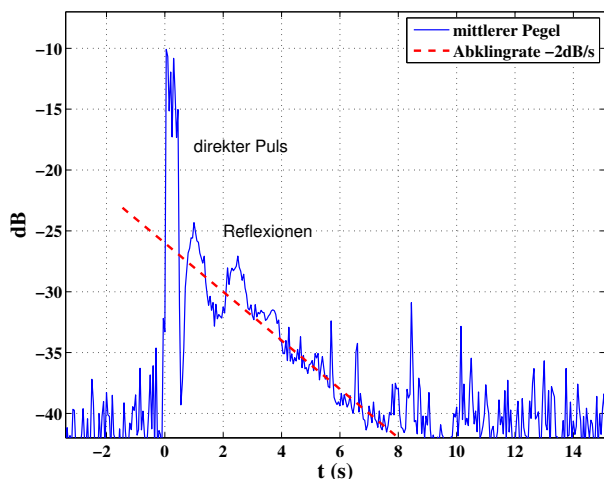


Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf des Spektralpegels im Frequenzband $f = [2, 3]$ kHz gemittelt über den Azimutwinkel. Der direkte Puls ist deutlich separiert von den Reflexionen und dem kontinuierlichen Anteil des Nachhalls. Ein Abklingprozess mit einer Rate von -2 dB/s ist zum Vergleich eingezeichnet.

Zum Vergleich ist in Abb. 4 der Verlauf eines Abklingprozesses mit einer Rate von -2 dB/s eingetragen. Eine solche Rate würde einer Nachhallzeit $T_{60} = 30$ s entsprechen. Dieses Ergebnis ermöglicht eine Abschätzung für die Dauer des pegeldominanten Nachhalls bei bekanntem Sende- und Umgebungsgeräuschpegel. Es ist allerdings davon auszugehen, dass diese Rate von den in der Einleitung genannten Faktoren (Seegebiet, Sende- und Empfangsparameter) beeinflusst wird und für andere Messgebiete und -anordnungen deutlich von diesem Wert abweichen kann.

Zusammenfassung

Mit einem von FS Elisabeth Mann Borgese abgehängten Sendewandler und einer frei driftenden Empfangsboje mit Kreisarray wurden im Juni 2019 Messungen des Nachhalls im norwegischen Sognefjord durchgeführt. Sender und Empfänger waren dabei in einem Schallkanal unterhalb der Thermokline positioniert. Mittels eines Delay-and-Sum-Beamformers konnten direkte Reflexionen aus unterschiedlichen azimutalen Richtungen identifiziert werden, an die sich ein kontinuierlicher Abfall des Nachhallpegels anschließt. Der Nachhall läßt sich bei diesen Messungen durch einem Abklingprozess mit einer Rate von -2 dB/s annähern.

Literatur

- [1] Abshagen, J.: Wasserschallmessungen, in: Möser, M. (Hrsg.), Fachwissen Technische Akustik, Springer, (2018)
- [2] A.P. Dowling: Underwater flow noise. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 10:135–153 (1998)
- [3] Abshagen, J., Nejedl, V.: Towed body measurements of flow noise from a turbulent boundary layer under sea conditions. *J. Acoust. Soc. Am.* 135. (2014), 637–645
- [4] E. Ciappi, S. De Rosa, F. Franco, J.L. Guyader, S.A. Hambric, R. Chi Kin Leung, A.D. Hanford (Hrsg.): *Flinovia - Flow Induced Noise and Vibration Issues and Aspects II*. Springer, Cham, (2019)
- [5] W.M. Carey and R.B. Evans, *Ocean Ambient Noise: Measurement and Theory*, Springer, New York (2011)
- [6] Urick, R.J.: *Principles of Underwater Sound* (2nd ed.). McGraw-Hill, New York, 1975
- [7] Medwin, H., Clay, C.S: *Fundamentals of Acoustical Oceanography*. Academic Press, San Diego (1998)
- [8] Abshagen, J., Stiller, D, Nejedl, V.: Schallausbreitung in einem Oberflächenkanal im norwegischen Sognefjord, Fortschritte der Akustik - DAGA2018, München (2018), 863-865
- [9] Schmidtke, E., Kreisarray zur Richtungsbestimmung akustischer Signale, Fortschritte der Akustik - DAGA 2016, Aachen (2016), 147–149