

# Untersuchung der Kopplung zwischen simultan gemessenem Körperschall und Wasserschall bei Überwasserschiffen

Andreas Galka<sup>1</sup>, Jan Abshagen<sup>2</sup>, Arne Stoltenberg<sup>2</sup>, Volkmar Nejedl<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Technische Fakultät, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Deutschland; Email: a.galka@pedneuro.uni-kiel.de

<sup>2</sup> Forschungsbereich für Wasserschall und Geophysik (FWG), WTD 71, Kiel, Deutschland

## Einleitung

Der auf Schiffen meßbare Körperschall wird durch eine Vielzahl von Quellen erzeugt (Maschinen, Generatoren, Pumpen), breitet sich in der Struktur des Schiffes aus und wird schließlich ins Wasser abgestrahlt, wo er als Wasserschall gemessen werden kann [1, 2]. Im Rahmen der Bemühungen um ein umfassendes Verständnis sowie eine Kontrolle der akustischen Signatur von Überwasserschiffen ist es erforderlich, die Kopplung zwischen Körperschall (KS) und Wasserschall (WS) zu untersuchen.

## Datenaufnahme und Vorverarbeitung

Für die vorgesehene Untersuchung werden simultan gemessene KS- und WS-Zeitreihen benötigt. Die dieser Arbeit zugrunde liegenden Daten wurden im August 2011 auf FS PLANET in Tiefwasserbedingungen gemessen; dieses Schiff besitzt eine Doppelrumpfstruktur (*small water area twin hull*). Die an den Spanten des Backbord-Rumpfes in jeweils senkrecht zueinander angeordneten Paaren installierten  $N = 24$  Sensoren liefern die KS-Zeitreihen (siehe Abb. 3), während die WS-Zeitreihen von einem Vertikal-Array mit 128 Hydrophonen aufgezeichnet werden, das von einer treibenden Boje ins Wasser herabhängt; die Hydrophone befinden sich dabei zwischen 24 m und 62 m Wassertiefe.

Zwecks Ausblendung von Störsignalen sowie Reduktion der Dimension der Daten werden die Signale der Hydrophone durch auf das Schiff gerichtetes Beamforming auf eine eindimensionale Repräsentation abgebildet; dabei werden die Signale eines unter dem Steuerbord-Rumpf installierten Pingers genutzt. Diese Signale ermöglichen es auch, KS- und WS-Zeitreihen auf eine gemeinsame Abtastrate zu transformieren und die zeitliche Verschiebung durch die Signallaufzeit im Wasser zu korrigieren.

Während einer Messung fährt das Schiff geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit und einem bestimmten Schiffszustand (bezüglich der aktiven Generatoren, der Drehzahlen, etc.) im Abstand von etwa 100 m an der Boje vorbei; der Punkt der geringsten Distanz wird dabei *closest point of approach* (CPA) genannt. Ein typisches Beispiel für die resultierenden Daten ist in Abb. 1 gezeigt; das gewählte Zeitintervall vom 8 s Länge liegt etwa im CPA dieser Messung.

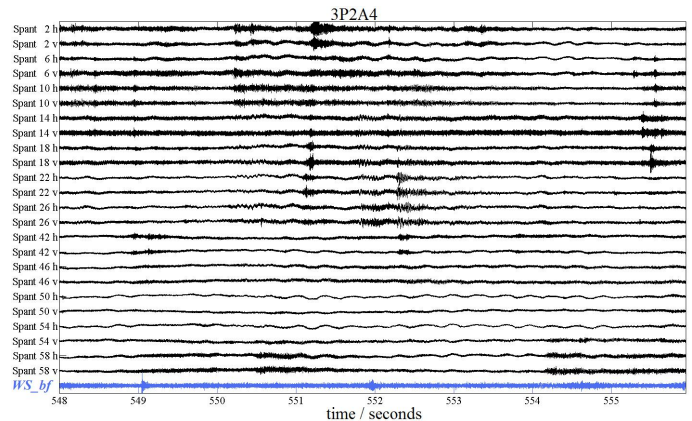


Abbildung 1: KS- und WS-Zeitreihen um den *closest point of approach* (CPA) herum (KS: 24 Spantensensoren; WS\_bf: Signal nach Beamforming)

## Methodik

Für die Untersuchung der Kopplung zwischen KS und WS schlagen wir eine Methodik vor, die auf der Analyse von Fluktuationen der Leistung innerhalb eines Satzes von Frequenzintervallen basiert. Zu diesem Zweck wird das gewählte Zeitintervall von 8 s Länge in  $W$  Fenster gleicher Länge unterteilt; das Frequenzintervall (0, 500)Hz wird in  $V$  Intervalle unterteilt, deren Grenzen gegeben sind durch eine Partition

$$(f_1 \equiv 0, f_2, f_3, \dots, f_V, f_{V+1} \equiv 500\text{Hz});$$

Frequenzen oberhalb von 500Hz werden nicht betrachtet. Die Frequenzen  $f_2, f_3, \dots, f_V$ , welche die Grenzen zwischen den Frequenzintervallen darstellen, müssen durch numerische Optimierung bestimmt werden (s.u.). Es bezeichne  $P^{\text{KS}}(w, v, c)$  die integrierte spektrale Leistung des  $c$ -ten KS-Sensors im Intervall  $(f_v, f_{v+1})$  und im Fenster  $w$ ; und entsprechend  $P^{\text{WS}}(w, v)$  für den Wasserschall (nach beamforming).

Wir setzen ein lineares Regressionsmodell für standardisierte  $P^{\text{KS}}(w, v, c)$  und  $P^{\text{WS}}(w, v)$  an:

$$P^{\text{WS}}(w, v) = \sum_{c=1}^N \beta(v, c) P^{\text{KS}}(w, v, c) + \epsilon(w, v).$$

Durch Standardverfahren ergeben sich die Regressionskoeffizienten  $\beta(v, c)$  sowie die zugehörigen Varianzen  $\sigma_{\beta}^2(v, c)$ . Ferner kann die Varianz der Regressionsfehler

berechnet werden,

$$\sigma_{LS}^2(\mathbf{f}) = \frac{1}{VW - 1} \sum_{w=1}^W \sum_{v=1}^V \epsilon^2(w, v),$$

wobei  $\mathbf{f} = (f_2, \dots, f_V)$  den Vektor der zu optimierenden Frequenzen bezeichnet, und der zugehörige t-Wert,

$$t(v, c) = \frac{|\beta(v, c)|}{\sigma_\beta(v, c)},$$

ist ein Maß für die Signifikanz, mit der ein Regressionskoeffizient von Null abweicht.

Ein mittlerer quadratischer t-Wert läßt sich definieren als

$$\bar{t}_{LS}^2(\mathbf{f}) = \frac{1}{VN} \sum_{c=1}^N \sum_{v=1}^V t^2(v, c).$$

Wir können damit einen regularisierten Regressionsansatz einführen, der als zusätzliches Optimierungsziel maximale Signifikanz der Regressionsparameter verwendet:

$$\text{minimiere } \phi_\lambda(\mathbf{f}) = \log(\sigma_{LS}^2(\mathbf{f})) - \lambda \log(\bar{t}_{LS}^2(\mathbf{f})), \quad (1)$$

$(f_2, \dots, f_V)$

wobei mit  $\lambda$  der Regularisierungsparameter bezeichnet ist. Eine Möglichkeit, einen optimalen Wert für  $\lambda$  zu bestimmen, stellt die sogenannte "L-Kurve" dar, i.e. die Kurve der mit  $\lambda$  parametrisierten Wertepaare

$$\left( -\log(\bar{t}_{LS}^2(\mathbf{f})), \log(\sigma_{LS}^2(\mathbf{f})) \right)$$

typischerweise weist sie für einen bestimmten Wert für  $\lambda$  maximale Krümmung auf, und dieser Wert wird dann als optimal betrachtet.

Die numerische Lösung des Optimierungsproblem (1) erfolgt bei  $V \leq 3$  mittels *exhaustive grid search* und bei  $V > 3$  mittels iteriertem *exhaustive grid search* innerhalb der Teilintervalle des Ergebnisses für  $V - 1$ .

Zum Vergleich kann anstelle einer optimierten Partition auch eine äquidistante Partition verwendet werden.

Die Optimierung wird durchgeführt für jeden Wert  $\lambda = 2^{-7}, 2^{-6}, \dots, 2^7$ . Partitionen werden iterativ bis  $V = 11$  verfeinert. Die Anzahl der Fenster im gewählten Zeitintervall beträgt  $W = 30$ .

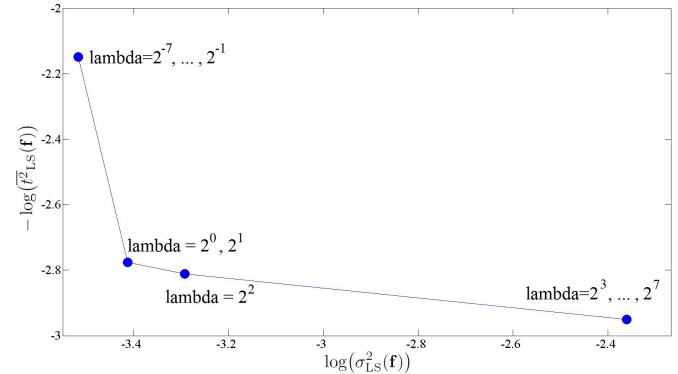
### Ergebnisse

Insgesamt wurden bislang 8 Datensätze (entsprechend jeweils einer Vorbeifahrt des Schiffes am Hydrophon-Array) mit der oben vorgestellten Methodik ausgewertet. Wir zeigen einige ausgewählte Ergebnisse.

In Abbildung 2 ist die L-Kurve für einen bei einer Geschwindigkeit von 6 kn aufgenommenen Datensatz, mit jeweils optimierten Partitionen in  $V = 5$  Frequenzintervalle, gezeigt. Die Form der Kurve entspricht der Erwartung und ergibt einen optimalen Regularisierungsparameter von  $\lambda = 1$  oder  $\lambda = 2$ . Wie in der Abbildung gezeigt, ergibt die Optimierung oft für mehrere verschiedene  $\lambda$  dieselbe Partition. Die äquidistante Partition ergibt für diesen Fall die Werte  $-\log(\bar{t}_{LS}^2(\mathbf{f})) = 0.894$ ,

$\log(\sigma_{LS}^2(\mathbf{f})) = -1.769$ , also einen Punkt weit rechts oben der optimierten Werte, entsprechend deutlich höherer Regressionsfehlervarianz und niedrigerer Signifikanz.

Für andere Werte von  $V$  sowie andere Datensätze berechnete L-Kurven sehen in den meisten Fällen ähnlich der gezeigten Kurve aus.



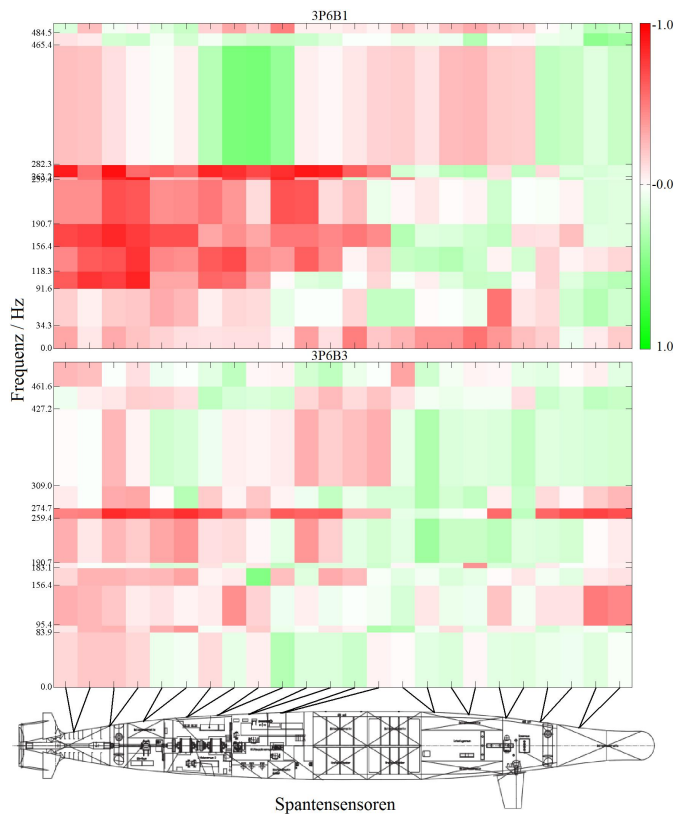
**Abbildung 2:** Beispiel einer L-Kurve für einen bei einer Geschwindigkeit von 6 kn aufgenommenen Datensatz, mit einer Partition in  $V = 5$  Frequenzintervalle.

Die Analyse ergibt ferner für jedes  $V$  und jedes  $\lambda$  eine Partition des Frequenzintervalls  $(0, 500)$ Hz sowie einen zugehörigen Satz Regressionskoeffizienten. Es hat sich gezeigt, daß die Regressionskoeffizienten nicht unmittelbar für die Untersuchung der Kopplung zwischen KS und WS nutzbar sind, da es an einer gemeinsamen Skala fehlt, auf der die Werte verglichen werden könnten. Hingegen sind die Kreuzkorrelationen zwischen  $P^{WS}(w, v)$  (als Regressand) und den  $P^{KS}(w, v, c)$  (als Regressoren) untereinander vergleichbar und daher für diesen Zweck geeignet.

Als Beispiel zeigt Abbildung 3 die (farbkodierten) Kreuzkorrelationen für zwei unter sehr ähnlichen physischen Bedingungen (i.e. gleiche Geschwindigkeit von 8 kn, ähnlicher Schiffszustand in Bezug auf aktive Generatoren, etc.) aufgenommene Datensätze, jeweils mit optimierten Partitionen in  $V = 11$  Frequenzintervalle.

Die Abbildung illustriert typische Partitionen, die sich aus der Optimierung ergeben; es ist sichtbar, daß sich die Partitionen deutlich von der äquidistanten Partition unterscheiden. Ferner ist sichtbar, daß einige Kennzeichen der Partitionen für unter ähnlichen Bedingungen aufgenommene Datensätze reproduzierbar sind, so etwa (in diesem Fall) ein schmales Frequenzintervall um 270 Hz mit hohen positiven Kreuzkorrelationen im hinteren Teil des Schiffes, oder ein breites Frequenzintervall im Bereich von 300-400 Hz. Auch einige großräumige Strukturen scheinen reproduzierbar zu sein, so beispielsweise das Vorherrschen positiver Kreuzkorrelationen bei Frequenzen unter 270 Hz im hinteren Teil des Schiffes, während im vorderen Teil bei höheren Frequenzen negative Kreuzkorrelationen erscheinen. Andererseits bestehen aber auch viele Unterschiede zwischen den Ergebnissen dieser beiden Datensätze.

Auch andere Paare von unter sehr ähnlichen Bedingungen aufgenommenen Datensätzen haben ähnliche Par-



**Abbildung 3:** Regressor-Regressand-Kreuzkorrelation für zwei bei einer Geschwindigkeit von 8 kn aufgenommene Datensätze, mit Partitionen in  $V = 11$  Frequenzintervalle; unten ist der Backbordrumpf von FS PLANET gezeigt, mit den Positionen der Spantensensoren (an jeder Position befinden sich zwei senkrecht zueinander angeordnete Sensoren).

tionen und Verteilungen der Regressor-Regressand-Kreuzkorrelation ergeben, so beispielsweise bei hoher Geschwindigkeit (15 kn) und Aktivität aller 4 Generatoren.

Wenn Datensätze analysiert werden, die unter deutlich abweichenden Bedingungen aufgenommen wurden, ergeben sich erwartungsgemäß deutlich andere Partitionen und Verteilungen der Regressor-Regressand-Kreuzkorrelation. Es ist bisher nicht gelungen, systematische Zusammenhänge zu erkennen zwischen diesen Ergebnissen und den zugrundeliegenden Schiffszuständen, bzw. physischen Bedingungen.

### Schlußbemerkungen

Es soll betont werden, daß es die Aufgabe dieses Beitrages ist, Zwischenergebnisse eines laufenden Forschungsprojektes vorzustellen.

Zum Zwecke der Untersuchung der Kopplung von KS und WS wurde ein Regressionsansatz gewählt, der auf die Fluktuationen der Leistung innerhalb eines Satzes von Frequenzintervallen (i.e., einer Partition) angewandt wurde; das Ziel dabei ist, die WS-Zeitreihe (nach Beamforming) als Regressand durch die KS-Zeitreihen der Spantensensoren als Regressoren vorhersagen zu können, mit dem Ziel einer Kontrolle der akustischen Signatur.

Besonderes Gewicht wurde auf die Bestimmung eines

optimalen Satzes von Frequenzintervallen gelegt, welche mittels numerischer Optimierung realisiert wird. Im Rahmen einer Regularisierung mit Bezug auf die Signifikanz der Regressionskoeffizienten konnte statistisch gezeigt werden, daß die optimierten Partitionen eine deutlich bessere Beschreibung der Daten ermöglichen als äquidistante Partitionen.

Es hat sich im bisherigen Verlauf des Projektes gezeigt, daß die Verteilungen der Regressor-Regressand-Kreuzkorrelationen, wie sie sich entsprechend der Ergebnisse der Optimierung und der Regressionsanalyse ergeben, eine nützliche Größe zur Quantifizierung der Kopplung zwischen KS und WS darstellen. Für unter ähnlichen physischen Bedingungen aufgenommene Datensätze wurden ähnliche Verteilungen gefunden. Hingegen war es bislang nicht möglich, systematische Zusammenhänge zwischen den physischen Bedingungen (insbesondere dem Schiffszustand) und den Verteilungen der Kreuzkorrelationen zu erkennen. Dies kann daran liegen, daß bisher nur eine begrenzte Anzahl an Datensätzen ausgewertet werden konnte.

Ein weiteres Problem liegt möglicherweise darin, daß die KS-Daten Signalkomponenten enthalten, die keine Relevanz für die Vorhersage des WS aufweisen. Die einzelnen Spantensensoren werden vermutlich auch solche akustische Signale aufzeichnen, die nicht oder nur schwach ins Wasser abgestrahlt werden. Wenn solche Komponenten im Frequenzbereich nicht auf bestimmte Teilintervalle eingegrenzt sind, wird unser Ansatz optimierter Partitionen durch solche Signalkomponenten erheblich beeinträchtigt werden. Es wäre somit notwendig, einen weiteren Vorverarbeitungsschritt einzufügen, der die KS-Daten in relevante und irrelevante Komponenten aufspaltet. Dies könnte mit Methoden wie *Independent Components Analysis* [4] oder *State Space Modelling* [5] erfolgen und wird Gegenstand der weiteren Arbeit in diesem Projekt sein.

### Literatur

- [1] Ross, D.: *Mechanics of underwater noise*. Pergamon Press, New York, 1972
- [2] Junger, M.C., und Feit, D.: *Sound, structure, and its interaction*. MIT Press, Cambridge (MA), 2. Aufl., 1986
- [3] Nejedl, V., Stoltenberg, A., und Schulz, J.: Free-field measurements of the radiated and structure-borne sound of RV "PLANET". Proc. 11th Europ. Conf. Underwater Acoustics, 2.-6.7.2012, Edinburgh, 814-821, 2012.
- [4] Hyvärinen, A., Karhunen, J., und Oja, E.: *Independent Component Analysis*. Wiley, New York, 2001
- [5] Durbin, J., und Koopman, S.J.: *Time Series Analysis by State Space Methods*. Oxford University Press, Oxford, 2001