Adaptives Beamforming als Teil einer klassischen SONAR-Signalverarbeitungskette

Sebastian Knabe[1], Jens Reermann[1]

[1] *ATLAS ELEKTRONIK GmbH, E-Mail: {sebastian.knabe, jens.reermann}@atlas-elektronik.com*

Kurzversion

Die meisten Signalverarbeitungsketten eines Passivsonars wie beispielsweise die Breitbanddetektion, die Pulsdetektion und die Schmalbanddetektion basieren auf der Analyse von Zeitbereichssignalen. Diese werden in der Regel zuvor einer Richtungsbildung (engl. *beamforming*, BF) unterzogen. Die Leistungsfähigkeit der Signalverarbeitungsketten ist folglich durch die Qualität dieser Vorverarbeitung limitiert. Ein konventioneller *Delay-and-Sum* BF-Ansatz ist begrenzt im Sinne der Verbesserung des Signal-zu-Rausch-und-Störungsverhältnisses (engl. *signal-to-noise-plus-interference ratio*, SNIR) oder der Zieltrennungsfähigkeit. Adaptive Richtungsbildung (engl. *adaptive beamforming*, ABF) hingegen kann eine verbesserte Leistungsfähigkeit erzielen und ist das Mittel der Wahl für Breitbanddetektionen (BDT).

ATLAS ELEKTRONIK GmbH (ATLAS) hat einen ABF als Teil einer Passivsignalverarbeitungskette entworfen, der nicht nur Spektren für die Breitbanddetektion mit einer geringen zeitlichen Auflösung berechnet, sondern ebenfalls entsprechende Zeitbereichssignale bereitstellt. Fokus liegt hierbei auf den Erhalt der vorteilhaften Eigenschaften des ABFs und der Anwendbarkeit von empfindlichen Schmalbandanalysen, wie z.B. *Low Frequency Analysis and Recording* (LOFAR) oder *Detection of Envelope Modulation on Noise* (DEMON).

In diesem Paper wird die Generierung der Zeitbereichssignale vorgestellt. Die Eigenschaften des Ansatzes werden anhand von Simulationen und Seedaten diskutiert.

Einleitung

Moderne U-Boote, die für die verdeckte maritime Aufklärung Verwendung finden, müssen so leise wie möglich operieren. Folglich wird die Verwendung von Aktivsonaren vermieden und die Passivsignalverarbeitung ist das beste Mittel um Information über die Umgebung und mögliche Ziele zu erfassen. Die Herausforderung ist es, möglichst viele relevante Information aus den verrauschten und unvollständigen Daten zu erhalten.

Die Basis jeglicher Verarbeitung sind Hydrophone, die am U-Boot verbaut sind. Typische Antennen sind zylindrische Arrays (engl. *cylindrical array sonar*, CAS) im Bug oder Seitenarrays (engl. *flank array sonar*, FAS) an den Seiten des U-Boots.

Um räumliche Informationen über die Signale zu erhalten, werden Richtungsbilder (engl. *beamformer*, BF) eingesetzt. Konventionelle Ansätze, wie ein *Delay-and-Sum* (DS) BF-Ansatz, sind diesbezüglich zwar robust und aufwandstechnisch günstig, allerdings muss immer ein Kompromiss zwischen Zieltrennung, Seitenband-unterdrückung und weiterer Performancemerkmale gefunden werden.

Aufgrund der erhöhten Rechnerleistungsfähigkeit erlauben moderne U-Boote die Verwendung alternativer und vielversprechender Ansätze. Diese basieren im Allgemeinen auf der Statistik der Hydrophonsignale und werden unter dem Begriff „adaptive Richtungsbildung“ (engl. *adaptive beamforming*, ABF) zusammengefasst.

ATLAS hat diese Ansätze bisher lediglich für die Breitbanddetektionen (BDT) implementiert [1,2]. Hierfür ist die empfangene Leistung als Funktion der Peilung und der Zeit berechnet worden. Parallel hierzu sind konventionelle Ansätze für Schmalbandanalysen oder der Bereitstellung einer Audiospur verwendet worden. Dementsprechend sind die vorteilhaften Eigenschaften vom ABF lediglich für eine begrenzte Anzahl der Analysefunktionen verfügbar gewesen. Daher hat ATLAS den bestehenden ABF erweitert, sodass nicht nur die Breitbanddetektion mit einer geringen zeitlichen Auflösung ermöglicht wird, sondern ebenfalls entsprechende Zeitbereichssignale (u.a. für die Schmalbandanalysen) berechnet werden.

Dieses Paper ist im Weiteren wie folgt strukturiert: Zunächst werden die klassischen Passivsignalverarbeitungsketten vorgestellt. Im Anschluss wird kurz auf das ABF eingegangen, bevor die entsprechenden Auswirkungen in Simulationen sowie in Seedaten diskutiert werden. Zum Schluss wird das Paper zusammengefasst und ein Ausblick gegeben.

Klassische Passivsignalverarbeitung

Klassisch finden in der Passivsignalverarbeitung eines U-Boots beispielsweise folgende Verfahren Anwendung (vgl. [3]):

- **BDT:** In der Breitbanddetektion wird die Leistung des gesamten Frequenzbands über Zeit und Peilung aufgetragen.
- **LOFAR**: In der tieffrequenten Frequenzanalyse (engl. *Low Frequency Analysis and Recording*) wird die Leistung frequenzabhängig über Peilung und Zeit betrachtet (vgl. Abbildung 1). Diese Analyse dient zur Bestimmung der Motorendrehzahl, der Zylinderdrehzahl und ähnlichen Parametern.
- **DEMON**: In DEMON (engl. *Detection of Envelope Modulation on Noise*) erfolgt eine Frequenzanalyse der Einhüllenden über Peilung und Zeit (vgl. Abbildung 1). Dies dient zur Analyse von

Geräuschen die sich aufgrund der Kavitation am Propeller ergeben.

Gemein haben diese Verfahren, dass die Analyse je Peilung erfolgt. Eine Richtungsbildung ist somit sinnvoll und deren Qualität hat einen großen Einfluss auf die Ergebnisse. Da ein Abgleich mit bekannten Merkmalen zumeist vorgesehen ist, ist es wichtig, dass der Austausch des Richtungsbilders keinen Einfluss auf die betrachteten Merkmale hat.

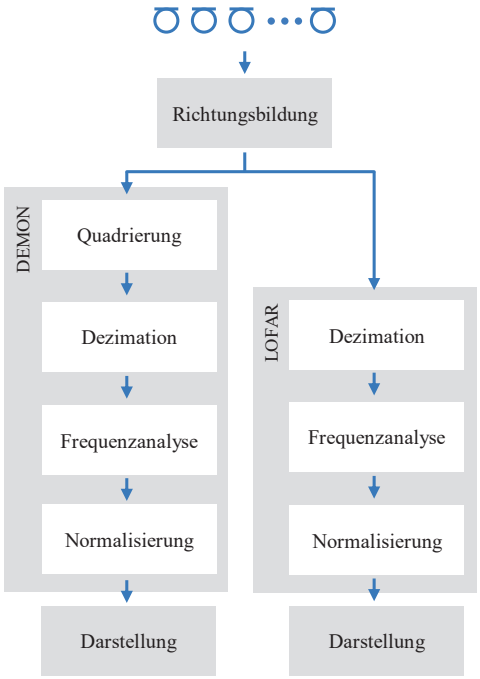

Abbildung 1: Signalflussdiagram der klassischen SONAR-Signalverarbeitungen DEMON und LOFAR. Die Darstellung hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit sondern soll vielmehr die wesentlichen Bestandteile zeigen.

Adaptives Beamforming

ABF ist eine weit verbreitete Technik [4]. Ziel ist es, mittels der Statistik der Hydrophonsignale $\boldsymbol{y}_m$ (Vektor aus N Hydrophonsignalen) die Gewichtungsfaktoren $\boldsymbol{w}(\varphi)$ zum Zeitpunkt n zu optimieren, so dass das Signal

$$s_n(\varphi) = \boldsymbol{w}(\varphi)^{\mathrm{H}} \boldsymbol{y}_n \tag{1}$$

in Peilung φ gewisse Eigenschaften (z.B. ein hohes Signal-zu-Rausch-und-Störungsverhältnisses, engl. *signal-to-noise-plus-interference ratio*, SNIR) aufweist. Diese Eigenschaften variieren je nach Implementierung und Auslegung des Beamformers. Die Statistik wird in der Regel durch die Kovarianzmatrix

$$\boldsymbol{R} = \mathrm{E}\{\boldsymbol{y}_n \boldsymbol{y}_n{}^{\mathrm{H}}\} \tag{2}$$

beschrieben. Da die Kovarianzmatrix zumeist nicht bekannt ist, muss diese beispielsweise auf Basis von M Messungen

$$\widehat{\boldsymbol{R}} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} \boldsymbol{y}_m \boldsymbol{y}_m{}^{\mathrm{H}} \tag{3}$$

geschätzt werden.

Ein verbreiteter und hier in seiner robusten Auslegung verwendeter Ansatz ist der sogenannte *Minimum Power Distortionless Response* (MPDR) Richtungsbilder [5], der eine Optimierung gemäß

$$\boldsymbol{w}_{\mathrm{MP}} = \operatorname{argmin}\left(\boldsymbol{w}^{\mathrm{H}} \widehat{\boldsymbol{R}} \boldsymbol{w}\right) \quad \text{s.t.} \quad \boldsymbol{w}^{\mathrm{H}} \boldsymbol{a}_{\mathrm{S}} = 1 \tag{4}$$

verfolgt. Dabei entspricht $\boldsymbol{a}_{\mathrm{S}}$ den Gewichtsfaktoren in Richtung der Nutzquelle.

In den bisherigen Ansätzen ist die Berechnung der Zeitsignale gemäß Gleichung (1) nicht erfolgt, da dies für BDT nicht notwendig ist [2]. Die Schwierigkeit bei der Berechnung der Zeitsignale besteht darin, dass keine Artefakte in den Analysen durch den ABF entstehen. Dies kann durch Anpassung der Auslegung und Parametrierung im Sinne der Frequenzauflösung, Blockgrößen, Überlapp und Auslegung der Peilungssektoren erzielt werden. Andere Verfahren sind aufgrund der gewonnen praxisrelevanten Erfahrungen mit dem MPDR zunächst nicht betrachtet worden.

Simulationen

Für einen ersten Vergleich der Algorithmen und deren Auswirkungen auf die klassische Passivsignalanalyse werden Simulationen durchgeführt.

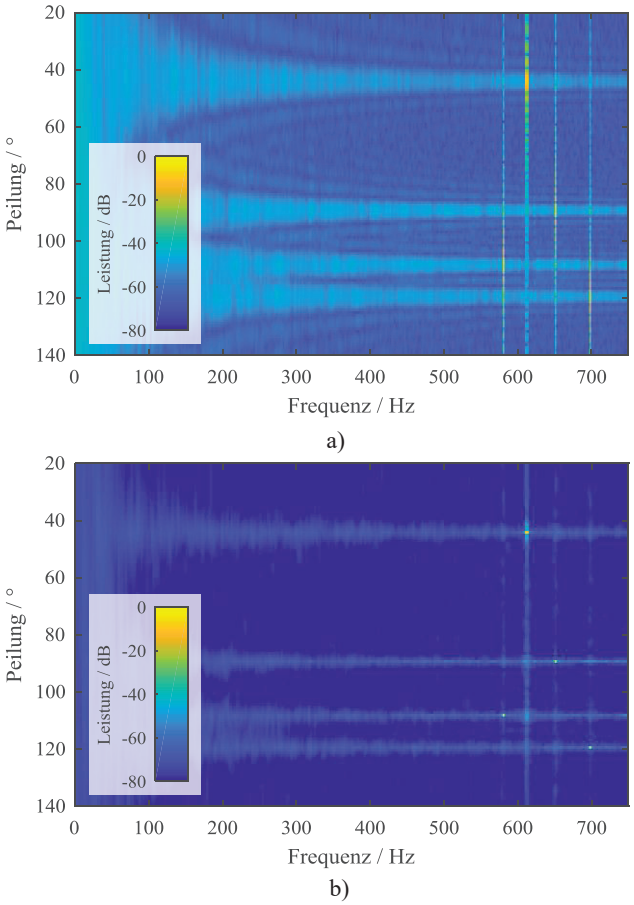

Abbildung 2: Spektren der BDT-Analyse einer Simulation In a) wird der klassische DS-BF verwendet, wohingegen in b) ein ABF verwendet wird. Deutlich zeigt sich die bessere Zieltrennung und Rauschunterdrückung.

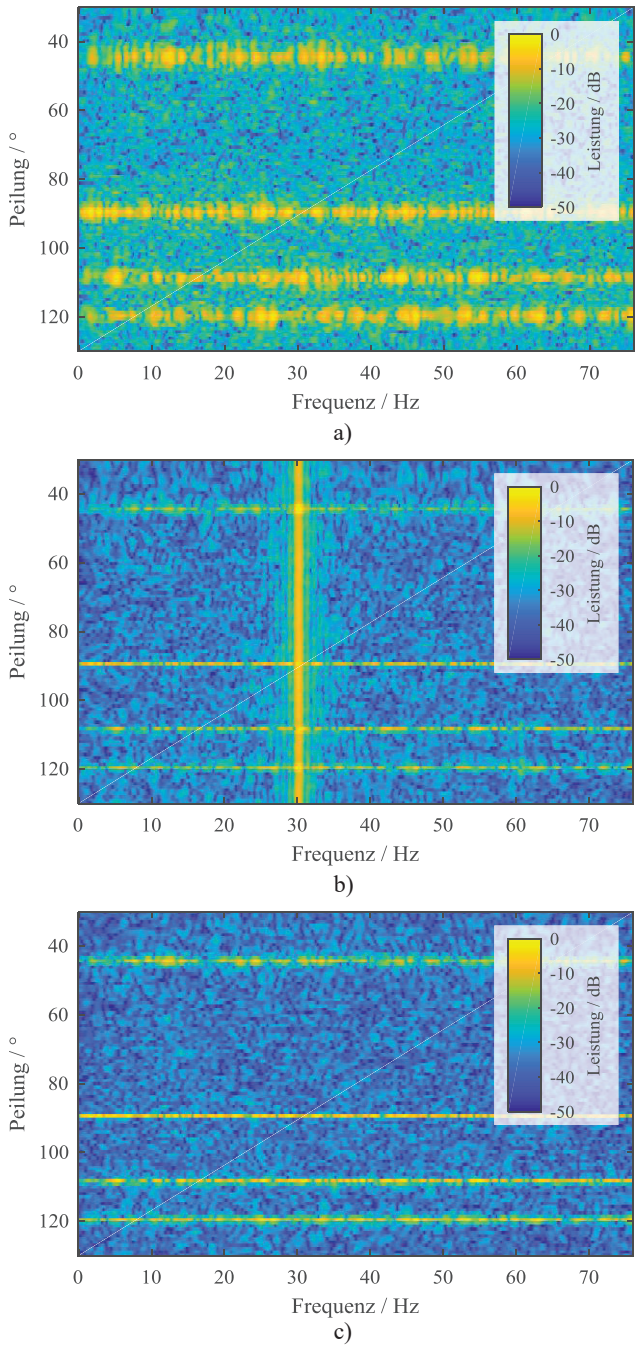

Abbildung 3: DEMON-Ergebnisse einer Simulation für unterschiedliche BF-Ansätze. In a) wird der klassische DS-BF verwendet, wohingegen in b) und c) ein ABF verwendet wird. Während es in b) zu Artefakten kommt, zeigen sich in c) aufgrund der verbesserten Auslegung deutlich bessere Ergebnisse im Vergleich zum klassischen Ansatz.

In Abbildung 2 ist das Ergebnis eines Zeitabschnitts einer BDT-Analyse dargestellt. Zur besseren Bewertung sind die jeweiligen verwendeten Spektren dargestellt. Vier Ziele haben sowohl schmalbandige (um 600 Hz) als auch breitbandige Eigenschaften. Sie befinden sich zwischen 40° und 120°. In Abbildung 2.a ist das Ergebnis nach einer klassischen Vorverarbeitung dargestellt. Die Ziele sind grundsätzlich erkennbar, allerdings ist die genaue visuelle Lokalisation teilweise schwer. In Abbildung 2.b wird ein ABF-Ansatz zur Richtungsbildung verwendet. Die Ziele lassen sich deutlich besser lokalisieren. Auf der einen Seite ist das Rauschen grundsätzlich geringer und auf der anderen Seite ist die Seitenbandunterdrückung merklich größer.

Wie bereits angedeutet, ist die Schmalbandanalyse deutlich empfindlicher für Variationen über die Zeit, die sich durch einen ABF ergeben können. Die Ergebnisse der DEMON-Analyse sind in Abbildung 3 dargestellt. Deutlich zeigt sich, dass die Ergebnisse sehr abhängig von der Richtungsbildung sind. Wird der klassische DS-BF verwendet, sind die Ziele bereits gut zu erkennen (vgl. Abbildung 3.a). Wird hingegen ein ABF verwendet, so ist die Auslegung entscheidend. Wird diese unvorteilhaft durchgeführt, besteht die Gefahr, dass Artefakte (vgl. Abbildung 3.a und 3.b) entstehen. Diese können zu einer Fehlinterpretation führen und sind somit inakzeptabel. Wird die Auslegung optimiert, so entstehen keine Artefakte (vgl. Abbildung 3.a, 3.b und 3.c). Darüber hinaus zeigen sich die positiven Eigenschaften des ABFs, da die Ziele deutlicher erkennbar sind (vgl. Abbildung 3.a und 3.c). Das SNIR hat sich deutlich verbessert.

Seedaten

Die Algorithmen sind ebenfalls mit Seedaten getestet worden. In Abbildung 4 ist das Ergebnis einer LOFAR-Verarbeitung zu sehen. Die Daten sind im Mittelmeer mit

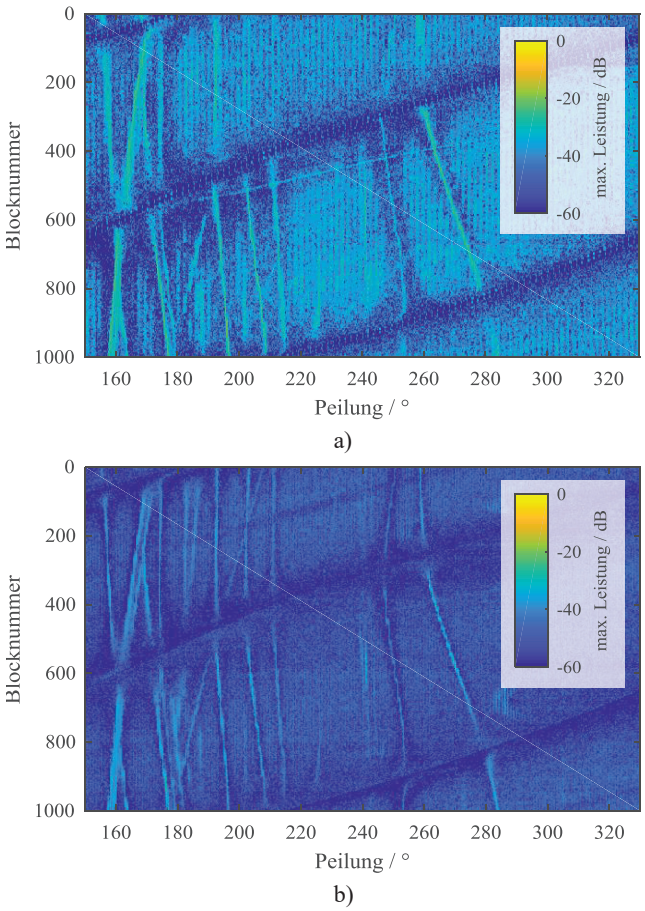

Abbildung 4: LOFAR-Ergebnisse der FAS-Antenne eines Seeversuchs im Mittelmeer. In a) wird der klassische DS-BF verwendet, wohingegen in b) ein ABF verwendet wird. Deutlich zeigt sich die bessere Zieltrennung und Rauschunterdrückung.

einer FAS-Antenne aufgezeichnet worden und sowohl mit einem klassischen DS-BF Verfahren (vgl. Abbildung 4.a) als auch mit einem ABF-Verfahren (vgl. Abbildung 4.b) vorverarbeitet worden. Um die vierdimensionalen Information darstellen zu können, ist jeweils der Maximalwert der Dimension Frequenz abgebildet. Der dargestellte Zeitraum entspricht einer vollen Drehung des U-Boots. Dies ist aus der Minimumspur – diese ergibt sich in Längsrichtung der Linearantenne – ersichtlich, da diese über die Zeit den kompletten Horizont abdeckt.

Der Vergleich zeigt, dass die Ziele mit der ABF-Vorverarbeitung deutlich sichtbarer werden. Es zeigen sich Spuren, die zuvor im Hintergrundrauschen verschwunden oder von benachbarten Zielen verdeckt worden sind.

Zum Vergleich ist in Abbildung 5 das Ergebnis der Breitbandanalyse (BDT) dargestellt. Erneut bilden sich die Spuren nach der ABF-Vorverarbeitung (vgl. Abbildung 5.b) besser als in konventionellen Vorverarbeitung (vgl. Abbildung 5.a) ab. Im Vergleich zur LOFAR-Verarbeitung sind Zielspuren besser zu erkennen. Dies ist jedoch stark von den vorhandenen Zielen abhängig.

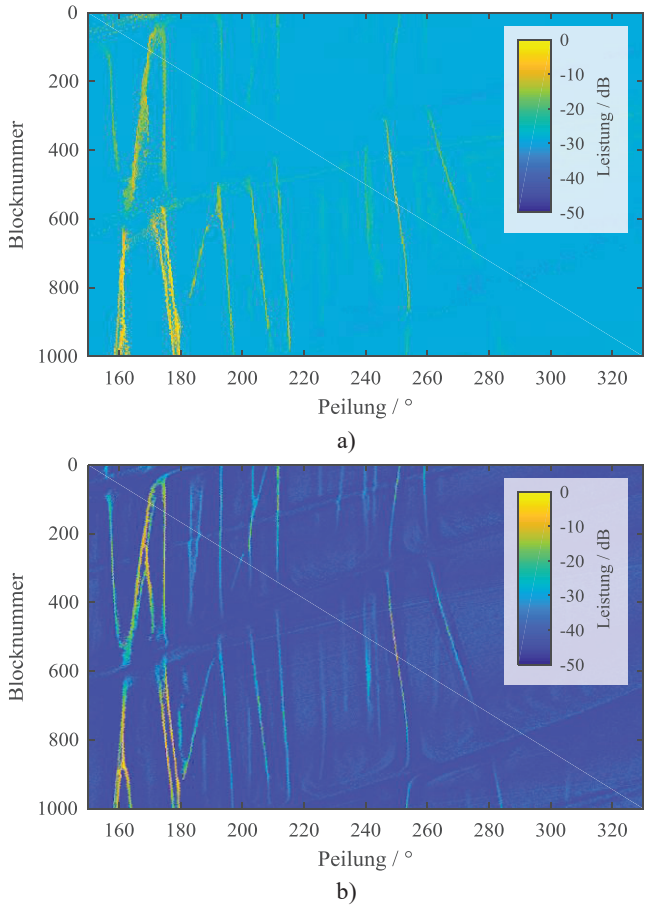

Abbildung 5: BDT-Ergebnisse der FAS-Antenne eines Seeversuchs im Mittelmeer. In a) wird der klassische DS-BF verwendet, wohingegen in b) ein ABF verwendet wird. Deutlich zeigt sich die bessere Zieltrennung und Rauschunterdrückung.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Paper ist ABF als Teil einer klassischen SONAR-Signalverarbeitungskette untersucht worden. Es sind sowohl die klassischen Passivsignalverarbeitungsketten vorgestellt worden als auch die grundsätzlichen Zusammenhänge des verwendet ABFs aufgeführt worden. Die anschließende Diskussion anhand von Simulation und Seedaten hat gezeigt, dass die Auslegung und Parametrierung sehr entscheidend ist. Gelingt dies, so sind die Ergebnisse deutlich besser im Sinne des SNIR und weiteren Performancekriterien. Anderenfalls ist mit Artefakten zu rechnen und die Analysen sind nicht verwendbar.

In Zukunft ist die Analyse weiterer Seedaten angedacht. Die Betrachtung alternativer Algorithmen erscheint ebenfalls sinnvoll. Wesentlich ist die Vermeidung von Artefakten beim gleichzeitigen Erhalt der Performancevorteile.

Literatur

[1] T. Bogner, K. Brinkmann und J. Hurka, High Resolution Beamforming for Improved Target Detection and Tracking in Passive Sonar Applications, Proceedings of UDT, Hamburg, Deutschland, 2010.

[2] S. Knabe und A. Schad, Multi-Purpose Adaptive Beamforming for Passive Sonar, Proceedings of UDT, Bremen, Deutschland, 2017.

[3] A. D. Waite, Sonar for practical Engineers, John Wiley & Sons Ltd, 3. Auflage, 2003.

[4] B. D. Van Veen und K. M. Buckley, Beamforming: a versatile approach to spatial filtering, IEEE ASSP Magazine, Band 5(2), 2010.

[5] J. Li und P. Stoica, Robust Adaptive Beamforming, John Wiley & Sons, 1. Auflage, 2006.