

Vergleich verschiedener piezoelektrischer Dünnschichtsensoren für SONAR-Anwendungen

Alexej Namenas¹, Hanna Lewitz², Jan Abshagen³, Eckhard Quandt², Gerhard Schmidt¹

¹ *Digitale Signalverarbeitung und Systemtheorie, CAU zu Kiel, E-Mail: {aln, gus@tf.uni-kiel.de}*

² *Anorganische Funktionsmaterialien, CAU zu Kiel, E-Mail: {hale, eq@tf.uni-kiel.de}*

³ *Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen, Maritime Technologie und Forschung (WTD 71)
24340 Eckernförde, E-Mail: {janabshagen@bundewehr.org}*

Kurzfassung

Im Rahmen einer Zusammenarbeit zwischen dem Lehrstuhl für digitale Signalverarbeitung, dem Lehrstuhl für Anorganische Funktionsmaterialien und in Kooperation mit der Wehrtechnischen Dienststelle 71 der Bundeswehr wurden Wasserschallmessungen von piezoelektrischen Dünnschichtsensoren analysiert, siehe Abbildung 2. Die verwendeten Sensoren unterschieden sich nach Art der verwendeten piezoelektrischen Materialien, Aluminium-Nitrid (AlN), Aluminium-Scandium-Nitrid (AlScN) und Blei-Zirkonat-Titanat PZT [1]. Als Referenz wurden Aufnahmen von Hydrophonen TC4050 von Reson verwendet. In einem definierten Messablauf wurden die Dünnschichtsensoren und Referenzhydrophone mit CW- bzw. LFM-Pulsen der Dauer 20 ms bzw. 500 ms im Vorbeifahren aus unterschiedlichen Entfernungen und Einfallswinkeln im Sognefjord, Norwegen, beschallt. Bei den gewonnenen Aufnahmen wurde eine SNR-Schätzung durchgeführt. Durch zusätzliche Abschätzung der interferierenden Signale und der Rauschanteile in nutzungsfreien Zeitabschnitten bei Referenzhydrophonen und Dünnschichtsensoren konnte die Robustheit der Frequenzgangschätzung der Sensoren verbessert werden. SNR-technisch unterlagen alle Dünnschichtsensoren den Referenzhydrophonen. Eine gute Performance zeigten die AlN- und die AlScN-Sensoren dennoch. Die PZT-Sensoren weisen das geringste SNR auf. Die betragsmäßige Frequenzgangschätzung anhand der Aufnahmen von LFM-Pulsen mit zusätzlicher Mittelung über alle Pings ergab für Sensoren gleicher Art ähnliche Verläufe.

Analyse-Methoden

Die Rekonstruktion des Messablaufes wurde an die schematische Darstellung in Abbildung 3 angelehnt. Um die Entfernungen d_1 (direkter Pfad) und $d_2 + d_3$ (Oberflächenpfad) zu bestimmen, wird in beiden Fällen die unbekannte Entfernung e benötigt. Die Entfernung e kann wiederum anhand der Laufzeitdifferenz zwischen dem direkten Pfad d_1 und dem Pfad der Oberflächenreflexion $d_2 + d_3$ geschätzt werden:

$$\Delta t = \frac{d_2(e) + d_3(e) - d_1(e)}{c}, \quad (1)$$

mit der Schallgeschwindigkeit c . Die Strecken d_1 und $d_2 + d_3$ lassen sich jeweils in Abhängigkeit von der

Variable e ausdrücken:

$$\begin{aligned} d_1(e) &= \sqrt{(a_{\text{Rx}} - a_{\text{Tx}})^2 + e^2}, \\ d_2(e) + d_3(e) &= \sqrt{(a_{\text{Rx}} + a_{\text{Tx}})^2 + e^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

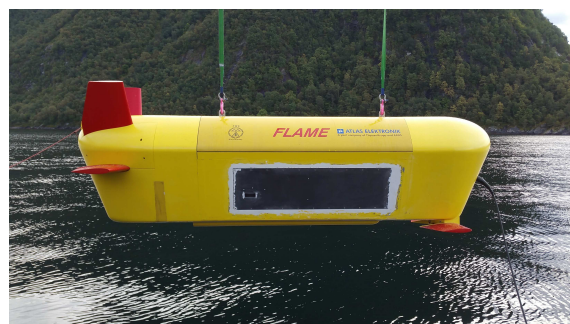


Abbildung 1: Schleppkörper FLAME.

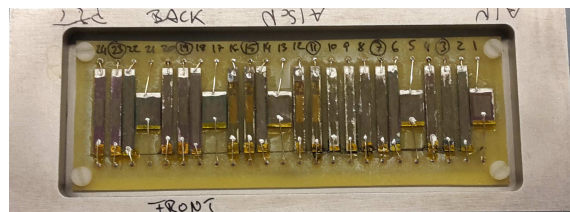


Abbildung 2: Array mit piezoelektrischen Dünnschichtsensoren.

wobei die Eintauchtiefen des Schleppkörpers (FLAME), wie er in der Abbildung 1 dargestellt ist, a_{Rx} und der Sender-Boje a_{Tx} bekannt sind, siehe Abbildungen 4 und 6. Die tatsächliche Laufzeitdifferenz konnte anhand der Referenzmesssignale bestimmt werden, siehe Abbildung 5. Setzt man die Gleichung 2 in Gleichung 1 ein, so bleibt nur noch die Variable e als eine einzige Unbekannte übrig. Wird die Variable e für unterschiedliche Laufzeitdifferenzen iteriert, so lässt sich die wahre Entfernung e abschätzen.

Die SNR-Schätzung wurde für das Sendesignal LFM-Sweep im Nutzfrequenzbereich von 3 kHz bis 10 kHz durchgeführt. Dazu wurden die Nutzfrequenzbereiche identifiziert, um anschließend Rauschleistung $|\hat{Y}_N(\mu)|^2$ und Signalleistung $|\hat{Y}_S(\mu)|^2$ in den einzelnen Pingperioden zu schätzen:

$$SNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{M} \sum_{\mu} \frac{|Y_S(\mu)|^2 - |\hat{Y}_N(\mu)|^2}{|\hat{Y}_N(\mu)|^2} \right). \quad (3)$$

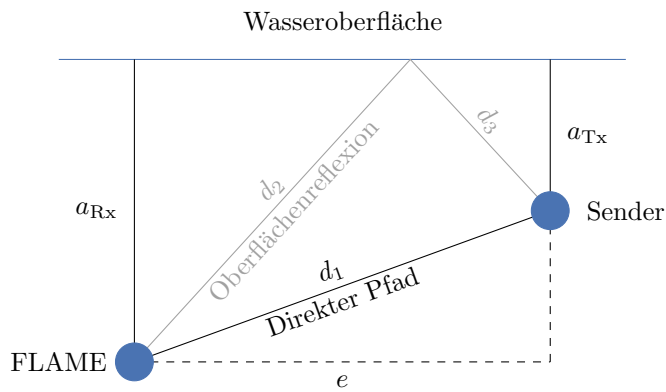


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Messablaufs mit der Positionierung der Sender-Boje (ITC 4008) und des Schlepptankers (FLAME), ausgestattet mit piezoelektrischen Dünnfilmsensoren und Referenzhydrophonen (RESON TC 4050).

Als letztes wurde der Frequenzgang der Sensoren geschätzt. Dieser wurde für die kürzeste Sender-Empfänger-Distanz beim 33 Ping durchgeführt. Hier liegen die Nutzsignale des direkten Pfades und der Oberflächenreflexion am weitesten auseinander. Für die Schätzung des Frequenzganges wurde angenommen, dass die Frequenzgänge des Senders und der Einfluss des Unterwasserkanals frequenzunabhängig und zeitinvariant sind. Damit lässt sich die Frequenzgangschätzung auf den folgenden Ausdruck bringen:

$$|\hat{H}_{R_x}(\mu)|^2 \approx \frac{|Y_S(\mu)|^2 - |\hat{Y}_N(\mu)|^2}{\max_{\mu} (|Y_S(\mu)|^2 - |\hat{Y}_N(\mu)|^2)}. \quad (4)$$

Durch anschließende Normierung auf den maximalen Wert der jeweiligen Frequenzgänge wurde sensorübergreifende Vergleichbarkeit hergestellt.

Analyse-Ergebnisse

Erschwert wurde die Schätzung der Entfernung e zwischen dem Sender und dem Empfänger durch die fehlenden Messstartpunkte und die variable Eintauchtiefe des Schlepptankers (FLAME), siehe Abbildung 6.

Während die Eintauchtiefe der Sender-Boje über die gesamte Zeit nahezu konstant 100 m betrug, ändert sich die Eintauchtiefe des Schlepptankers (FLAME) aufgrund von Wendemanövern stark. Für kurze Entfernungen zwischen dem Schlepptanker (FLAME) und der Sender-Boje, wie sie um die 33 Pingperiode vorliegen, macht sich die Veränderung der Eintauchtiefe der Flame weniger bemerkbar. Das macht die Schätzung genauer. Für größere Entfernungen streuen die Schätzwerte viel stärker. In der Abbildung 7 sind die Mediane der Entfernungsschätzung dargestellt.

In der Abbildung 8 ist die SNR-Schätzung der einzelnen Sensorsignale für die jeweiligen Pingperioden dargestellt. Die Signale der Referenzhydrophone in Abbildung 8 (a) weisen zu allen Zeitpunkten das bessere SNR auf. Abgesehen von den absoluten Werten, sind die Verläufe nahezu identisch. Die SNR-Werte der Dünnfilmsensoren

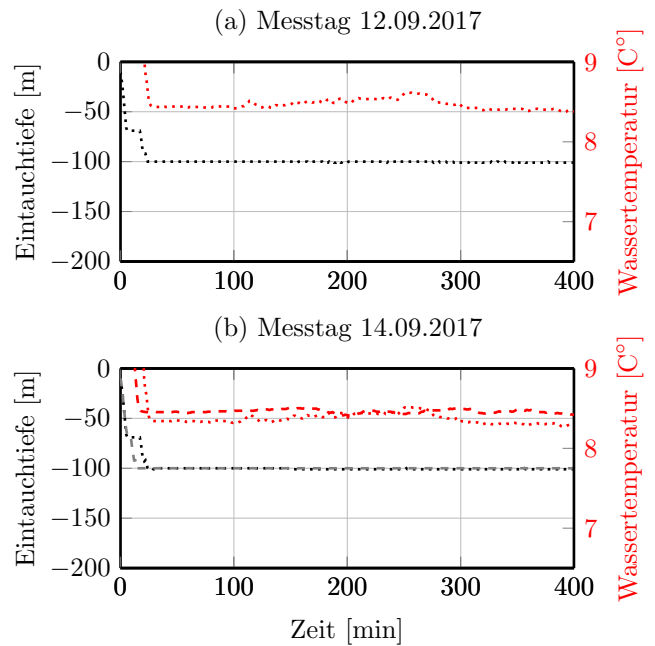


Abbildung 4: Dargestellt ist die Eintauchtiefe des Senders und die jeweilige Temperatur an den letzten beiden Messtagen. Der Druck und die Temperatur wurden am zweiten Tag mit einem und am dritten Tag mit zwei PT-Loggern erfasst.

sind geringer. In Abbildungen 8 (b), (c) und (d) ist jeweils das SNR der ausgewählten Sensoren, wie sie in der Tabelle 1 aufgelistet sind, dargestellt. Diese haben die gleichen Maße und sind zudem verstärkt gewesen. Im Vergleich zu den Referenzhydrophonen ist das SNR der Dünnfilmsensoren um bis zu 20 dB geringer. Auch bei der Frequenzgangschätzung, siehe Abbildung 9, weisen die Referenzhydrophone untereinander nahezu gleichen Frequenzgang auf, der über die Frequenz von 3 kHz bis 10 kHz im Bereich von 10 dB variiert. Die Frequenzgänge der Dünnfilmsensoren, siehe Abbildung 9 (b), (c) und (d), sind stark variabel und unterscheiden sich zudem stark von einander. Über die Frequenzgänge sind Bereiche starker Dämpfung zu beobachten, wie zum Beispiel beim AlN-Sensor f6 bei ca. 8.2 kHz oder beim AlScN-Sensor s4 bei ca. 5.5 kHz. Wie diese Frequenzeinbrüche zustande kommen, lässt sich zu diesem Zeitpunkt nicht

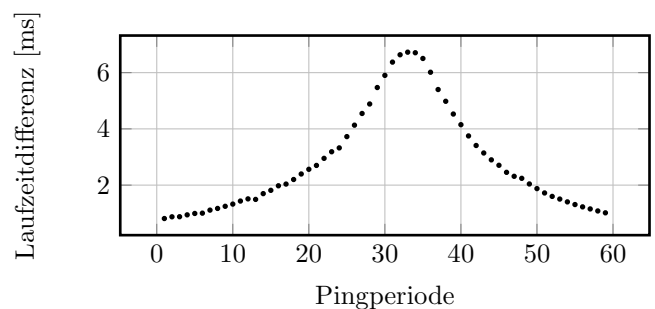


Abbildung 5: Gemittelte Laufzeitdifferenz zwischen den eintreffenden Wellen, bestimmt anhand der Signale der Referenzhydrophone (RESON TC 4050).

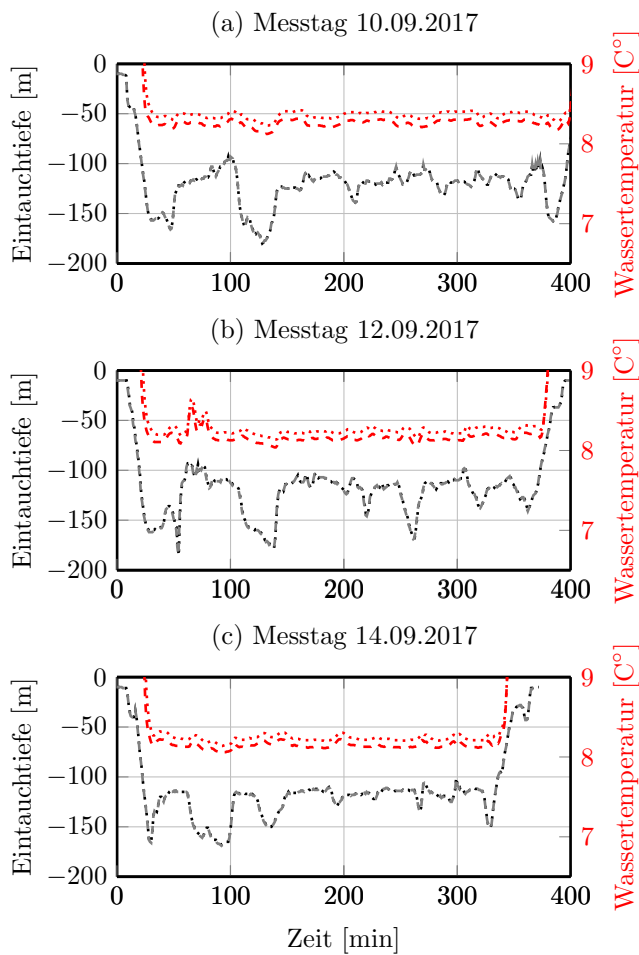


Abbildung 6: Dargestellt sind die Eintauchtiefen des Schleppkörpers (FLAME) und die jeweilige Temperatur an den einzelnen Messtagen. Der Druck und die Temperatur wurden mit zwei PT-Loggern, vorne (gestrichelte Linie) und hinten (gepunktete Linie) am Schleppkörper befestigt, erfasst.

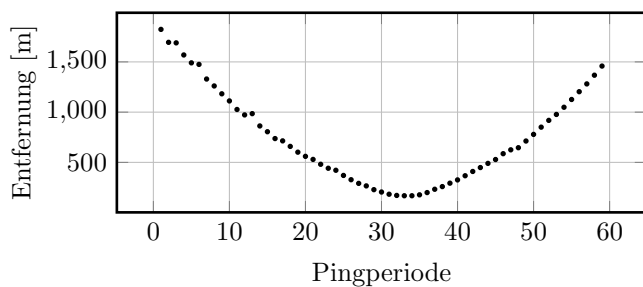


Abbildung 7: Geschätzte Entfernung des Schleppkörpers (FLAME) von der Sende-Boje (ITC 4008) am zweiten Messtag.

erklären.

Fazit und Ausblick

Anhand der grundlegenden Geometriesätze und der beschreibenden Statistik konnte der Messablauf vollständig rekonstruiert werden. Durch die Begrenzung der Messsignale auf die Nutz-Frequenzanteile durch Bandpassfilterung und anschließende Matched-Filterung mit dem Original-Signal konnten die Nutzsignal-Bereiche identifiziert werden. Die Schätzung des Nutzsignals und des

Tabelle 1: Geometrie der ausgewählten Dünnschichtsensoren.

Variante	Parameter		
	Breite [mm]	Länge [mm]	Fäche [mm ²]
AlN (f6)	2	8	16
AlScN (s4)	2	8	16
PZT (a3)	2	8	16

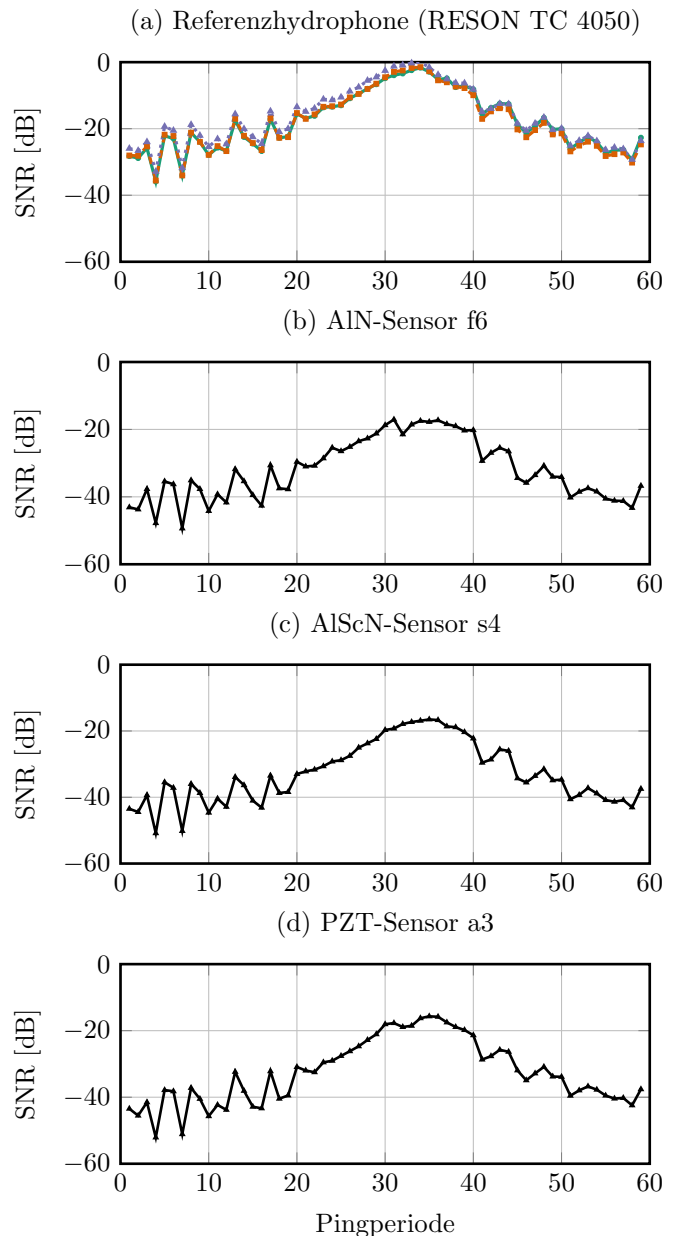


Abbildung 8: SNR-Schätzung der Sensorsignale für das Sende-signal LFM-Sweep von 3 kHz bis 10 kHz.

Rauschens wurde für die Berechnung des SNR verwendet. Frequenzgangschätzung der Dünnschichtsensoren wurde unter der Annahme durchgeführt, dass der Unterwasserkanal und der Frequenzgang des Senders einen frequenzunabhängigen Einfluss aufweisen. Die anschließende Normierung der Frequenzgänge sollte diese vergleichbar ma-

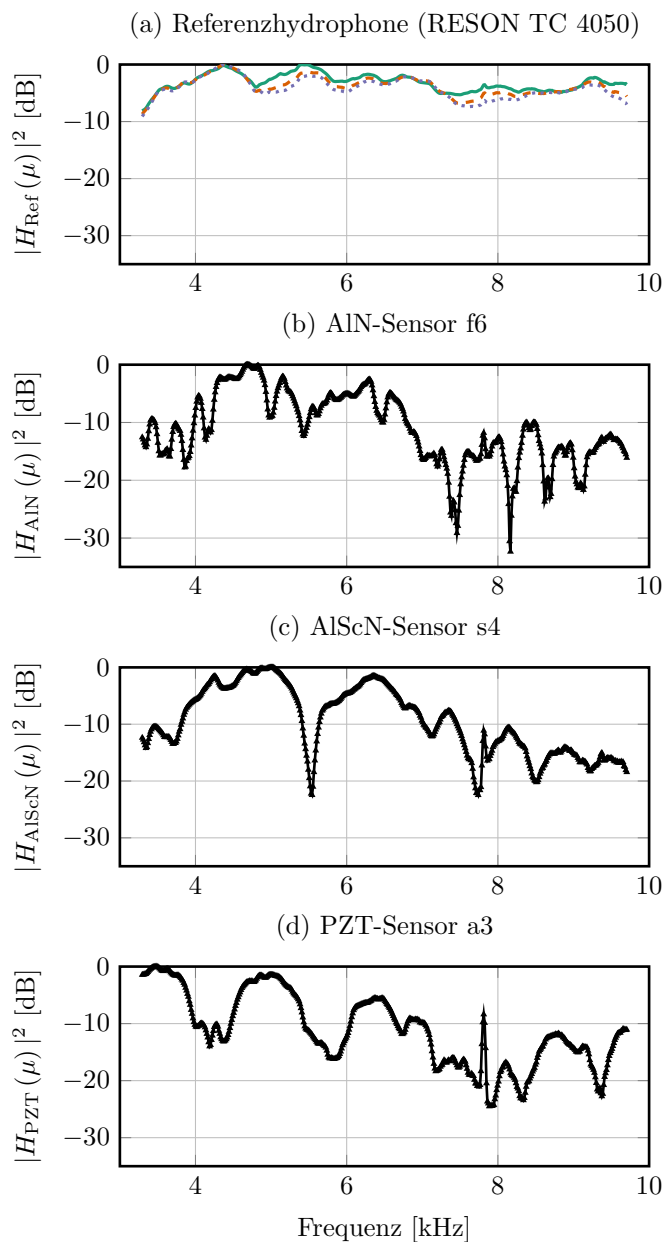


Abbildung 9: Schätzung des normierten Frequenzganges der Sensoren für das Sendesignal LFM-Sweep von 3 kHz bis 10 kHz.

chen. Um eine bessere Frequenzgangschätzung durchzuführen, sollten mehrere Dünnschichtsensoren gleicher Bauart (Material, Geometrie, Dicke der aktiven Schicht) in einer zeitinvarianten Unterwasserumgebung ausgemessen werden, um mögliche Einflussfaktoren von vornherein auszuschließen. Das SNR sah bei allen Sensoren vergleichbar aus. Es lässt sich beobachten, dass die Dünnschichtsensoren, auch wenn einige gleiches Frequenzverhalten aufweisen, dennoch einen stark fluktuierenden Frequenzgang besitzen, der teilweise im Bereich von bis zu 30 dB schwankt. Die unterschiedlichen Bauformen bieten keine schlüssige Erklärung weder für das SNR-Verhalten noch für den geschätzten Frequenzgang. Das Potential der piezoelektrischen Sensoren ist jedoch nicht von der Hand zu weisen. Die Sensoren sind billig in der Herstellung und ihre kompakte Bauweise erlaubt

es mehrere Sensoren auf geringem Raum zu verbauen. Damit ließe sich eine SNR-technische Verbesserung herbeiführen. Die teils starken Frequenzeinbrüche lassen sich mit den Hilfsmittel der Signalverarbeitung, wie Equalizing, nur begrenzt ausgleichen.

Literatur

- [1] Hanna Lewitz, Eckhard Quandt: Influence of piezoelectric materials on the performance of thin film hydrophones, The Journal of the Acoustical Society of America, 141(5), Seiten 3495-3495, DOI: 10.1121/1.4987306, Mai 2017