

Entwurf und Implementierung einer schnellen Frequenzgangmessung und automatischer Entzerrung von akustischen Schallwandlern

Bastian Kaulen¹, Hanna Lewitz², Tim Owe Wisch¹, Frederik Kühne¹, Gerhard Schmidt¹

¹ *Digitale Signalverarbeitung und Systemtheorie, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Email: {bk, timw, frk, gus}@tf.uni-kiel.de*

² *Anorganische Funktionsmaterialien, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Email: hale@tf.uni-kiel.de*

Kurzfassung

Das Vermessen von akustischen Schallwandlern wie Projektoren und Hydrophonen ist notwendig, um die Leistungsfähigkeit von nachfolgenden Signalverarbeitungsstrukturen optimal nutzen zu können. Gerade in Array-Anwendungen ist das gleiche Verhalten aller Elemente wichtig, um gute Resultate zu erzielen. Dazu werden die jeweiligen Testobjekte oft in einem möglichst schallarmen Messtank mit bekannten Signalen charakterisiert. Ein großes Problem stellt hierbei die Reflexionen an Wänden und der Wasseroberfläche dar. Durch die beschränkten Abmessungen des Tanks leiden die zu erzielenden Ergebnisse und es muss für eine genauere Messung über viele Pulse gemittelt werden, was die Gesamtdauer der Messung erhöht. In diesem Beitrag wird die Verwendung eines adaptiven Filters zur Bestimmung der Impulsantwort vorgestellt, dies neben einem kontinuierlichen breitbandigen Senden und Klassifizieren, auch zusätzlich eine Aussage über die Qualität der Messung ermöglicht. So lässt sich sowohl sehr viel zuverlässiger als auch schneller messen. Anschließend werden die ermittelten Frequenzgänge mittels einer digitalen Filterstruktur zu einem gewünschten Frequenzgang entzerrt. Dies kann zum Beispiel der Mittelwert aller Frequenzgänge eines Arrays sein, wodurch ein einheitliches Verhalten des gesamten Arrays erreicht wird. Sowohl das Vermessen als auch die Entzerrung wurde in einem Echtzeit-Signalverarbeitungsprogramm umgesetzt und ermöglicht somit eine deutliche Reduzierung der gesamten Messdauer von Arrays.

Einleitung

Im folgenden Beitrag wird eine Methode zum Messen von Frequenzgängen von akustischen Schallwandlern vorgestellt. Dabei liegt der Fokus auf einer zuverlässigen und schnellen Vermessung, die besonders für Arrays ausgelegt ist. Dies wird am Beispiel einer durchgeführten Messung im Messtank der WTD 71 Kiel erläutert. Hierzu wird zuerst der allgemeine Messaufbau beschrieben. Anschließend wird der Ablauf der einzelnen Schritte durchgegangen und Zwischenergebnisse dargestellt. Abschließend wird eine Zusammenfassung mit möglichen Erweiterungen gegeben.

Messaufbau

Die Messung wurde im Messbecken der WTD 71 im Marinearsenal Kiel durchgeführt. Der dort vorhandene Tank besitzt die Ausmaße von $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$. Das Projektorarray wurde ca. 1 m von der Stirnseite mittig auf ca. 1,5 m

Tiefe gehängt. Das Empfangshydrophon wurde ca. 1 m entfernt von der gegenüberliegenden Seite in der Mitte des Beckens auf ebenfalls ca. 1,5 m Tiefe gehängt. Dies ist in Abbildung 1 zu erkennen.

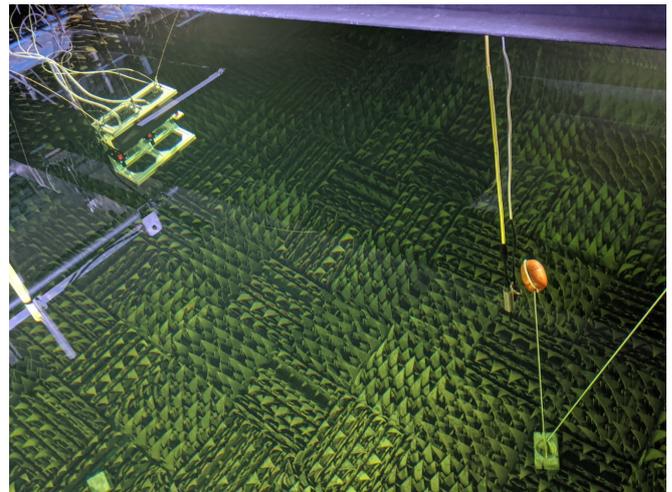


Abbildung 1: Messtank der WTD 71 mit Sendearray und Empfangshydrophon.

Zum Vermessen wurde ein Projektorarray der Firma Atlas Elektronik¹ gewählt. Dieses besitzt 32 Sendeelemente, eine Mittenfrequenz von 50 kHz und eine Bandbreite von ca. 15 kHz. Als Empfangshydrophon wurde das Reson TC4014-5 der Firma Teledyne Marine² gewählt. Dies zeichnet sich durch einen sehr großen nutzbaren Frequenzbereich und hoher Sensitivität aus. Ein Datenblatt zu dem Hydrophone ist unter [3] zu finden.

Der in Abbildung 2 dargestellte Messaufbau zeigt die Anordnung und Verschaltung des Equipments. Um den Einfluss des Audiointerfaces, des DA-Wandlers und des AD-Wandlers auf den Frequenzgang zu reduzieren, wurde ein Kanal des DA-Wandlers direkt mit einem Kanal des AD-Wandlers verbunden und als Adaptionssignal für den Normalized-Least-Mean-Square-Algorithmus (NLMS-Algorithmus) gewählt [2]. So können unter der Annahme, dass alle Kanäle denselben Frequenzgang besitzen, die Einflüsse der Messhardware vollständig entfernt werden. Somit haben lediglich die Frequenzgänge von Projektor und Hydrophon und Einflüsse des Kanals einen Effekt auf die eigentliche Messung. Da je nach Messung ein Referenzprojektor, bzw. Referenzhydrophon verwendet wird, kann der so bekannte Frequenzgang ebenfalls später entfernt werden. Um

¹<https://www.atlas-elektronik.com/>

²<http://www.teledynemarine.com>

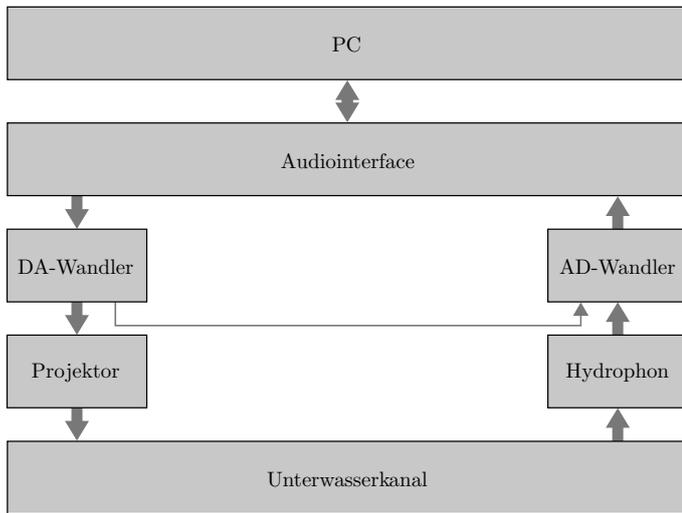


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Signalfusses.

den gesuchten Frequenzgang nun störungsfrei vermessen zu können, müssen die Einflüsse des Kanals entfernt werden, was im Folgenden erläutert wird.

Messung der Impulsantworten

Das Vermessen von Unterwasserschallwandlern wird üblicherweise in speziellen entkoppelten Messtanks durchgeführt, die besonders rauscharm sind, um die Charakterisierung so genau wie möglich durchführen zu können. Diese Messbecken haben aber das natürliche Problem der relativ geringen Größe, besonders im Vergleich zur Schallgeschwindigkeit von ca. $1500 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Durch diese baulich bedingte Limitierung stellen die Reflexionen an Wänden, am Boden und an der Wasseroberfläche die größte Störung dar, da sie zu konstruktiven oder destruktiven Interferenzen führen können, welche die gesamte Messung verfälschen. Die Lösung des Problems ist das Ausnutzen der Geometrie des Messbeckens in Form der zeitlichen Trennung des Direktschalls von den Reflexionen. Dazu ist es am sinnvollsten, die Impulsantwort des Messtanks zu messen. So können anschließend die durch das Becken entstandenen Reflexionen entfernt werden und der entstörte Frequenzgang durch die Fourier-Transformation des Direktschalls bestimmt werden.

Der zeitliche Unterschied zwischen Direktschall und erster Reflexion kann dabei berechnet werden. Dies entspricht, aufgrund der Geometrie des Beckens, bei einer Abtastrate $f_s = 192 \text{ kHz}$ einer Anzahl von $N_{\text{samp}} \approx 159$ Abtasttakten und reicht damit aus, um den Direktschall von der ersten Reflexion trennen zu können. Eine typische Impulsantwort ist in der Abbildung 4 dargestellt.

Blanked-Impulse-Response-Algorithmus

Ein Teil der hier vorgeschlagener Methode baut auf dem Blanked-Impulse-Response-Algorithmus (BIR-Algorithmus) auf. Dieser wurde speziell zur Vermessung von Projektoren und Hydrophonen in reflexionsreichen Messbecken entworfen und wurde in der Publikation [1] detailliert beschrieben. Hierzu wird ein bekanntes Signal mit einem Projektor gesendet und mit einem Hydrophon aufgezeichnet. Anschließend werden das Sende-

und das Empfangssignal in den Frequenzbereich transformiert und durcheinander geteilt. Aus dem so entstandenen Spektrum kann durch die inverse Fourier-Transformierte die Impulsantwort gebildet werden. Daraufhin kann mit einer Fensterfunktion der Direktschall ausgeschnitten und in den Frequenzbereich transformiert werden. Die hier vorgeschlagene Methode nutzt nun eine andere Art zur Bestimmung der Impulsantwort und erweitert den Umfang durch das automatische Berechnen von Entzerrungsfiltren, um somit einen einheitlichen Frequenzgang für alle Elemente zu gewährleisten.

Bestimmung der Impulsantwort mittels adaptiven Filters

Im Gegensatz zum BIR-Algorithmus wird in dieser Veröffentlichung die Impulsantwort nicht über das Teilen zweier Spektren, sondern durch die Systemidentifikation mittels adaptiven Filters bestimmt. Dies bietet zudem den Vorteil, dass neben der eigentlichen Schätzung des zu identifizierenden Systems auch eine Adaption auf den mittleren quadratischen Fehler zwischen echten und geschätztem System ermittelt wird. Dieser Fehler lässt damit auf die Güte der Schätzung schließen und ermöglicht es eine Aussage über die Zuverlässigkeit der Messung zu treffen. Der gewählte Algorithmus ist der in beschriebene NLMS-Algorithmus. Dieser wurde als Echtzeitvariante im Frequenzbereich implementiert. Als Anregungssignal wurde weißes Rauschen gewählt, das somit den kompletten Frequenzbereich gleichermaßen anregt.

NLMS-Algorithmus

Der NLMS-Algorithmus wird zum Beispiel in adaptiven Filtern verwendet und nutzt ein Gradientenverfahren zur Minimierung des mittleren quadratischen Fehlers zweier Signale. Je nach Einsatz des Algorithmus kann dieser unter anderem Systeme identifizieren oder entzerren. Auf eine detaillierte Herleitung sei hierbei verzichtet und auf [2] verwiesen. Dabei wurde der Signalfluss nach Abbildung 3 in Form der Systemidentifikation gewählt.

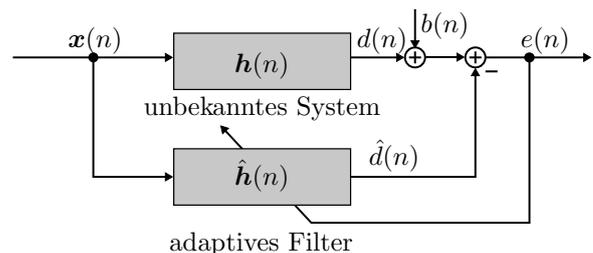


Abbildung 3: Adaptives Filter zur Systemidentifikation.

Die Gleichungen für den NLMS-Algorithmus zur Schätzung eines unbekannten Systems $\mathbf{h}(n)$ mit dem Sendesignal $\mathbf{x}(n)$ lauten demnach nach [2]:

$$\hat{d}(n) = \hat{\mathbf{h}}^H(n) \mathbf{x}(n), \quad (1)$$

$$e(n) = d(n) - \hat{d}(n) + b(n), \quad (2)$$

$$\|\mathbf{x}(n)\|^2 = \|\mathbf{x}(n-1)\|^2 - |\mathbf{x}(n-N)|^2 + |\mathbf{x}(n)|^2, \quad (3)$$

$$\hat{\mathbf{h}}(n+1) = \hat{\mathbf{h}}(n) + \mu \frac{\mathbf{x}(n) e^*(n)}{\|\mathbf{x}(n)\|^2}. \quad (4)$$

Dabei stellt $e(n)$ das Fehlersignal und $\hat{h}(n)$ das geschätzte System dar. N bezeichnet dabei die gesamte Länge des Filters $h(n)$ und die Schrittweite μ dient als Trade-Off-Parameter zwischen Konvergenzgeschwindigkeit und der Endabweichung des Filters. Zusätzlich wird additives Rauschen durch $b(n)$ dargestellt. Mit den Gleichungen 1 bis 4 ist dies eine sehr effiziente Methode, um Systeme in Echtzeit und mit wenig Rechenaufwand zu identifizieren.

Bestimmung des Frequenzgangs

Die mittels NLMS-Algorithmus bestimmter Impulsantwort ist in Abbildung 4 als blaue Linie eingezeichnet. Aus Gründen der Übersicht wurde lediglich die Impulsantwort zwischen dem ersten Projektor des Arrays mit dem Referenzhydrophon dargestellt. Dabei ist neben dem Direktschall in Form des ersten Puls noch weitere Reflexionen der Wände und Oberfläche gut zu erkennen.

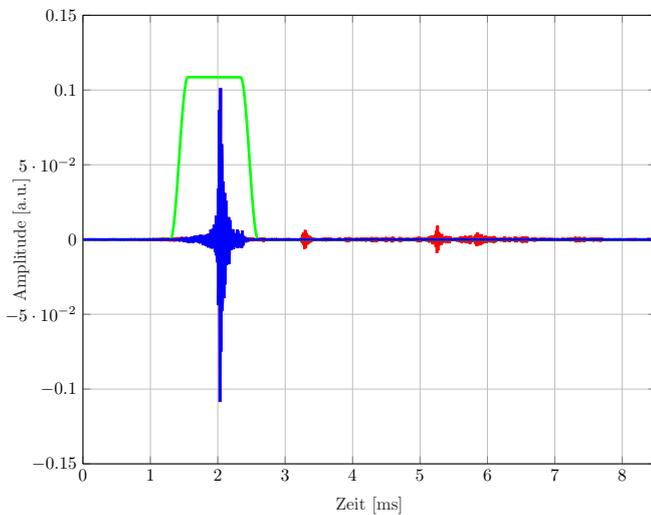


Abbildung 4: Typische Impulsantwort des Messtanks der WTD 71.

Um nur den Direktschall zu erhalten, wird die Impulsantwort mit einem Tukey-Fenster gefenstert und so nur der relevante Bereich um den ersten Puls ausgeschnitten. Das Fenster ist dabei in der Abbildung 4 als grüne und der so resultierende Direktschall als blaue Linie hervorgehoben. Die zuvor berechnete gesamte Impulsantwort ist durch die rote Linie gegeben.

Da die Darstellung für jedes der 32 Elemente in den nachfolgenden Abbildungen unübersichtlich wäre, wurde sich auf die Angabe des minimalen, maximalen und durchschnittlichen Wertes aller jeweiligen Kurven beschränkt. Dies gibt eine schnellere Übersicht über die Performanz des Arrays. Zusätzlich wurde nur der Bereich von 45 kHz bis 60 kHz betrachtet, da dieser den Frequenzbereich darstellt, in dem die Arrays betrieben werden sollen.

Die Abbildung 5 zeigt den Betragsfrequenzgang von 45 kHz bis 60 kHz über die 32 Elemente des Arrays. Es ist zu erkennen, dass die Abweichungen um den durchschnittlichen Betragsfrequenzgang nicht mehr als 2 dB betragen. Zudem lässt sich eindeutig die maximale Sendeleistung bei der Frequenz von 50 kHz erkennen.

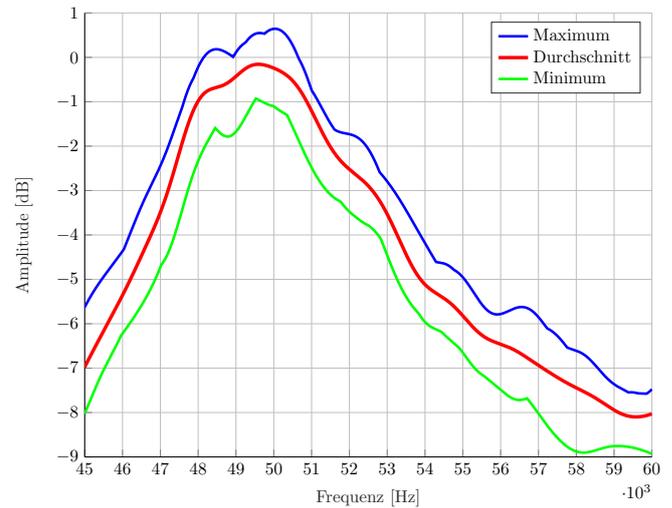


Abbildung 5: Betragsfrequenzgang des Sendearrays von 45 kHz bis 60 kHz über 32 Elemente.

Neben den Betragsfrequenzgängen wurden außerdem die Gruppenlaufzeiten der Arrays bestimmt und in Abbildung 6 dargestellt aufgezeigt.

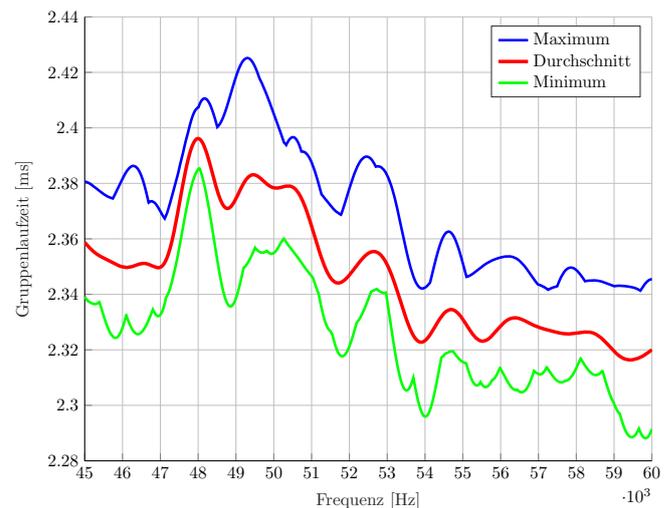


Abbildung 6: Gruppenlaufzeit des Sendearrays von 45 kHz bis 60 kHz über 32 Elemente.

Entzerrung

Da nun die Frequenzgänge für alle Elemente bestimmt sind, kann bei Bedarf der Frequenzgang des Referenzhydrophons entfernt werden. Da es in der hier vorgestellten Messung allerdings um die Entzerrung der Arrayelemente auf den Durchschnitt aller gemessenen Frequenzgänge geht, kann dieser Einfluss vernachlässigt werden, da jede Messung mit demselben Hydrophon im Abstand von wenigen Minuten durchgeführt wurde. Letztendlich ist das Entwurfskriterium des Entzerrers allerdings frei wählbar und kann vom Benutzer vorgegeben werden.

Die verwendete Form zur Entzerrung jedes Frequenzganges wurde in Form des prädiktionsbasierten Filterentwurf umgesetzt. Auf eine detaillierte Herleitung sei hier verzichtet und stattdessen auf [4] verwiesen. Grundlegend werden dabei mit Hilfe der linearen Prädiktion Koeffi-

zienten berechnet, die den Betragsfrequenzgang glätten und invertieren. Dies kann sehr recheneffizient mit dem Levinson-Durbin-Algorithmus gelöst werden, der ebenfalls in [4] beschrieben ist und resultiert in Koeffizienten eines Finite-Impulse-Response-Filters (FIR-Filter), der leicht auf das Sende-, bzw. das Empfangssignal angewendet werden kann. Eine beispielhafte Darstellung ist dabei in Abbildung 7 gegeben. Dabei wurde ein ursprünglich weißes Signal über einen Projektor ausgegeben und aufgenommen. Dies ist als rotes Signal dargestellt. Das grüne Signal entspricht dem Betragsfrequenzgang des Entzerrers. Im Idealfall sollte nach der Filterung des Empfangssignal wieder vollständig weiß sein, allerdings ist dies aufgrund der begrenzten Filterlänge nicht möglich. Eingezeichnet ist dies als blaues Signal.

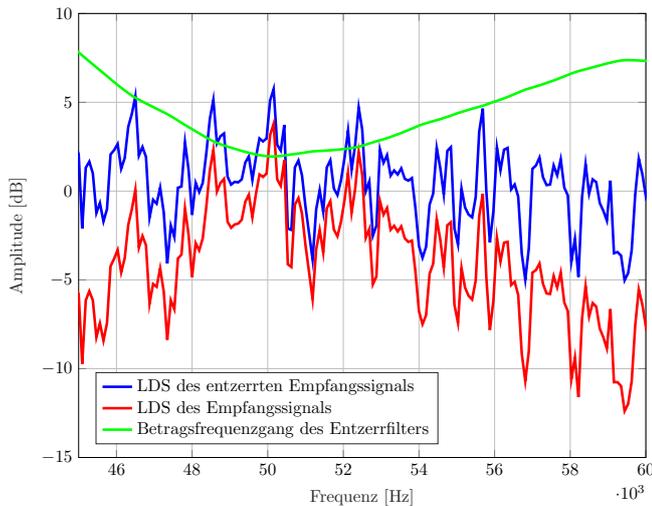


Abbildung 7: LDS des Empfangssignals (rot), geglätteter Betragsfrequenzgang des Entzerrfilters (grün) und entzerrtes Signal (blau).

Da der durchschnittliche Frequenzgang vom Benutzer festgelegt wurde, können die Entzerrer für jede Projektor-Hydrophon-Kombination entworfen werden. Die Anzahl an Filterkoeffizienten konnte vorher vom Benutzer festgelegt werden und bestimmt dabei sowohl die Qualität als auch die Laufzeit der Entzerrung.

Anschließend kann eine zweite Messung durchgeführt werden, welche die entworfenen Entzerrer anwendet und verifiziert. Das allgemeine Vorgehen ist analog zur ersten Messung durchgeführt. Auf diese Art und Weise kann eine effiziente Entzerrung durchgeführt werden. Dies ist besonders interessant, wenn mehrere Frequenzgänge ausgetriggert werden sollen.

Implementierung

Die hier aufgezeigte Methode zur Bestimmung und Entzerrung von Unterwasserschallwandlern wurde in das Echtzeit-Signalverarbeitungsprogramm KiRAT (Kiel Real-time Application Toolkit) implementiert. Damit können viele Messungen sehr effizient und schnell ausgeführt und direkt ausgewertet werden. Zusätzlich wird, nachdem alle Messungen abgeschlossen sind, ein zusammenfassender Bericht erzeugt, der alle Messergebnisse

vor und nach der Entzerrung darstellt und als Messprotokoll dient. Außerdem werden sowohl die Frequenzgänge als auch die digitalen Filterkoeffizienten für jeden Projektor, bzw. Hydrophon abgespeichert, damit diese für die spätere Anwendung und eventuelle Analysen verwendet werden können. Ein Screenshot der Benutzeroberfläche ist in der Abbildung 8 dargestellt.

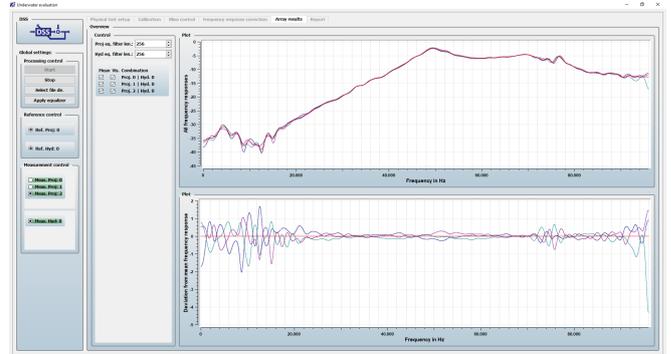


Abbildung 8: Screenshot von KiRAT mit gemessenen Frequenzgängen und deren Abweichungen.

Zusammenfassung

Es wurde der Entwurf einer automatischen Signalanalyse beschrieben, die eine schnelle und zuverlässige Messung von Projektoren und Hydrophonen ermöglicht. Durch das Verwenden eines adaptiven Filters lässt sich zur Laufzeit auf die Güte der Messung schließen und somit bei einem ausreichend kleinen Fehler die Messung vorzeitig beenden, was die Messdauer reduziert. Zusätzlich wurde ein prädiktorbasierter Entzerrere Entwurf vorgestellt und implementiert, der eine Angleichung verschiedener Frequenzgänge ermöglicht. Aufgrund der Implementierung in ein Echtzeitprogramm konnte das Messen von Frequenzgängen gerade in Bezug auf die Vermessung von Arrays enorm beschleunigt werden. Als mögliche Erweiterung sei zum einen die Entzerrung der Gruppenlaufzeit verwiesen, die im hier vorgestellten Ansatz nicht weiter berücksichtigt wird. Zum anderen sind andere Messgrößen wie das Signal-zu-Rausch-Verhältnis oder auch die Direktivität von Interesse.

Literatur

- [1] Schulze, S.: Echo Reduction in Hydro-Acoustic Measurements. Underwater Acoustics Conference and Exhibition (2015), Vol. 3, 273-280
- [2] Hänslér, E. und Schmidt, G.: Acoustic Echo and Noise Control: A Practical Approach. Wiley-Interscience, USA, 2004
- [3] Teledyne Marine RESON: Datenblatt Reson TC4014. <http://www.teledynemarine.com/Lists/Downloads/RESON/Hydrophones/TC4014%20product%20leaflet.pdf>, 2020, letzter Zugriff: 07.03.2022
- [4] Iser, B. und Schmidt, G. und Minker, W.: Bandwidth Extension of Speech Signals. Lecture Notes in Electrical Engineering, Springer US, 2008