

Charakterisierung der Dämpfungseigenschaften von akustischen Dämmmatten in einer Unterwassertankumgebung

Christian Kanarski^{1,2}, Bastian Kaulen¹, Frederik Kühne¹, Marco Driesen¹,
Karoline Gussow¹, Finn Röhrdanz¹, Konstantinos Karatziotis¹, Lukas Schirmer¹,
Ralf Burgardt¹, Viktoriia Boichenko¹, Gerhard Schmidt¹

¹*Digital Signal Processing and System Theory, Kiel University, Kiel, Germany*

²*DeepSea Monitoring Working Group, GEOMAR Helmholtz Center for Ocean Research Kiel, Kiel, Germany*

Email: {chk, bk, frk, madr, kars, finr, koka, lusc, rabu, vib, gus}@tf.uni-kiel.de¹

Abstract

In einer Tankumgebung können Mehrfachreflexionen an den Tankwänden die Qualität von Unterwassermessungen beeinträchtigen. Diese Reflexionen können durch akustische Dämmmatten, die an den Tankwänden befestigt werden, gedämpft werden. In dieser Studie sollen die akustischen Dämpfungseigenschaften ausgewählter Dämmmatten hinsichtlich ihrer Wirksamkeit zur Reduktion des Nachhalls bewertet werden. Dazu werden auf Basis von Charakterisierungsmessungen die Impulsantworten der Matten adaptiv bestimmt und darauf aufbauend deren frequenzselektiven Eigenschaften analysiert. Die Dämpfungseigenschaften werden im Vergleich zu den Reflexionseigenschaften der Tankwände bewertet. Mit Hilfe von SONAR-Scans der Tankumgebung werden die Unterschiede zwischen den Reflexionen an den Tankwänden und den Matten auch visuell verglichen.

Einleitung

Im Rahmen hydroakustischer Messungen in einer Unterwasserumgebung kommt es zu Reflexionen der sich ausbreitenden hydroakustischen Wellen am Boden und der Wasseroberfläche. In einer Tankumgebung entstehen weitere Reflexionen der Schallwellen an den Tankwänden. Die kurzen Distanzen zwischen SONAR-System und den Tankwänden resultieren in einem begrenzten Zeitfenster, bevor der Nachhall als Störsignal in die Empfangssignale einkoppelt. Um diese unerwünschten Reflexionen zu dämpfen, kann akustisches Dämmmaterial eingesetzt werden und z.B. in Form von akustischen Dämmmatten an den Wänden angebracht werden. Die Annahme ist hierbei, dass es frequenzabhängig zur Dämpfung der Wellenlängen kommt, die in die Matte eindringen und dort absorbiert werden. Zusätzlich werden bestimmte Wellenlängen an der Oberfläche diffus reflektiert, so dass die Intensität der direkten Reflexionen reduziert wird.

In dieser Studie wird die Effektivität dieser Dämmwirkung untersucht. Hierfür wurde die maritime Messstrecke, ein mit Wasser gefülltes Becken der Größe $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 5\text{ m}$ in Abb. 1 im Zentrum für vernetzte Sensornetze (ZEVS) [1] an der Technischen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, mit *REGUPOL playfix FX* [2] Matten ausgekleidet. Diese Matten bestehen aus Synthetikgummi und sind wasserdurchlässig. Es wird untersucht, ob sich diese als Dämmmatten eignen und wie sehr Reflexionen gedämpft und Nachhall im Wassertank reduziert wird.



Abbildung 1: Wassertank der maritimen Messstrecke im Zentrum für vernetzte Sensornetze (ZEVS) der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Messung

Zur Messung wurde das SONAR-System des Lehrstuhls für Digitale Signalverarbeitung und Systemtheorie verwendet, welches über ein 32-Projektor-Sendearray und ein 32-Hydrophon-Empfangsarray verfügt und somit als MIMO-System (*Multiple-Input Multiple-Output*) verwendet werden kann. Das System wurde in einer SIMO-Konfiguration (*Single-Input Multiple-Output*) betrieben, wobei ein Projektor als Sender verwendet wird und mit den 32 Hydrophonen empfangen wird.

Das SONAR-System ist an die Verarbeitungseinheit in Abb. 2 angeschlossen und es wird eine Abtastrate von 192 kHz verwendet. Hierbei wird das Sendesignal nach der digital-analog Wandlung direkt an den analog-digital Wandler übergeben, um dieses als Referenzkanal für die spätere Verarbeitung zu nutzen [3]. Dieses SONAR-System wurde in den beiden dargestellten Messszenarien in Abb. 3 in einer Tiefe von 3.70 m und einem Abstand von 1.70 m jeweils mittig vor der Tankwand platziert. Hierbei wird die Tankumgebung wie in Abb. 3(a) ohne Dämmung und in Abb. 3(b) mit teilweiser Dämmung der Wände aufgenommen.

Als Sendesignal wird für 30 Sekunden das gleichverteilte weiße Rauschen

$$x_{tx}(n) \sim U(-1, 1), \quad (1)$$

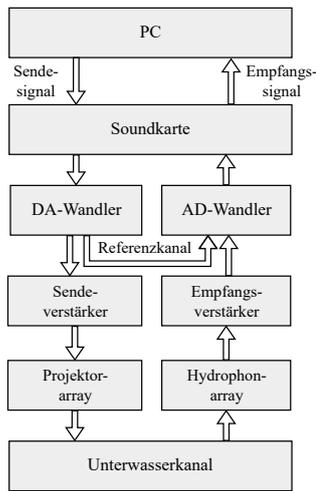
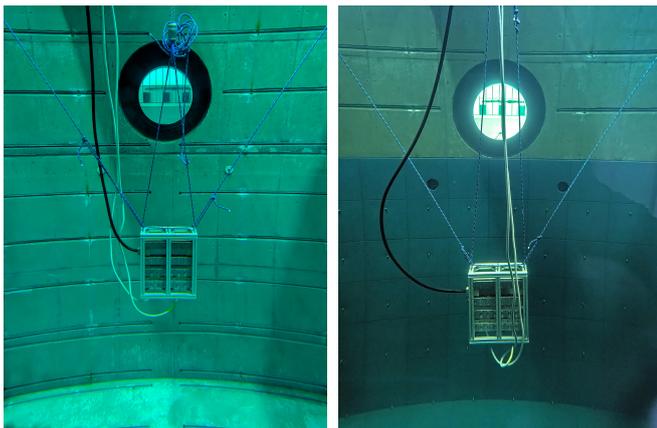


Abbildung 2: Verarbeitungskette des SONAR-Systems.

über einen Projektor ausgegeben. Zeitgleich zum Sendestart werden auch die Empfangssignale $\mathbf{y}_{rx}(n)$ aller 32 Hydrophone aufgenommen. Nach der Aufzeichnung werden diese als Sendesignalvektor $\mathbf{x}_{tx}(n)$ und Empfangssignalmatrix $\mathbf{Y}_{rx}(n)$ für die weitere Prozessierung gespeichert.



(a) Tankwand ohne Dämmung. (b) Mit Matten gedämmte Tankwand.

Abbildung 3: Messszenarien im Wassertank.

Verarbeitung

Die Verarbeitungskette der Messdaten ist in Abb. 4 dargestellt. Zur Bestimmung der Tankimpulsantworten wird der NLMS-Algorithmus (*Normalized Least Mean Squares*) in Abb. 5 verwendet. Das adaptive Filter bestimmt

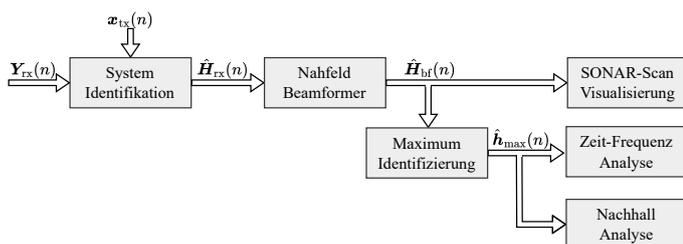


Abbildung 4: Signalverarbeitung der Messdaten zur Analyse der Dämmwirkung.

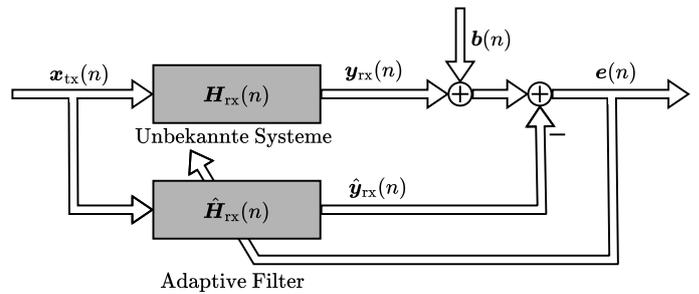


Abbildung 5: Systemidentifikation der Tankimpulsantworten durch den NLMS-Algorithmus.

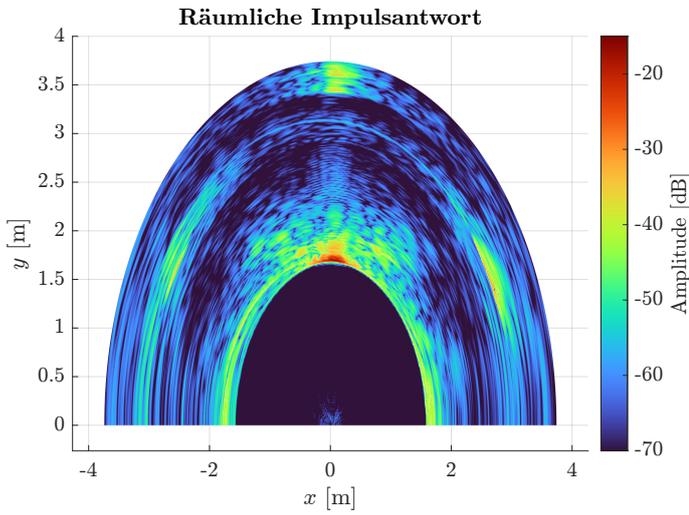
für jedes Hydrophon die geschätzte Tankimpulsantwort, basierend auf der Minimierung des Fehlervektors $\mathbf{e}(n)$, wie in [3] ausführlich beschrieben. Diese werden in der Impulsantwortmatrix $\mathbf{H}_{rx}(n)$ zusammengefasst und durch Nahfeldbeamforming werden 180 Beams über 180° gebildet, um die räumliche Impulsantwortmatrix $\hat{\mathbf{H}}_{bf}(n)$ zu erzeugen. Diese ist in Abb. 6 als SONAR-Scan der Tankumgebung dargestellt. Aus der Impulsantwortmatrix wird für beide Messszenarien die Impulsantwort $\hat{\mathbf{h}}_{max}(n)$ mit der maximalen Energie bestimmt und jeweils als Spektrogramm in Abb. 7 dargestellt. Zudem wird ein längerer Ausschnitt dieser Impulsantwort, für die weitere Analyse der Nachhallzeiten durch Darstellung des Betragsquadrats der Impulsantworten, in Abb. 8 verwendet.

Analyse

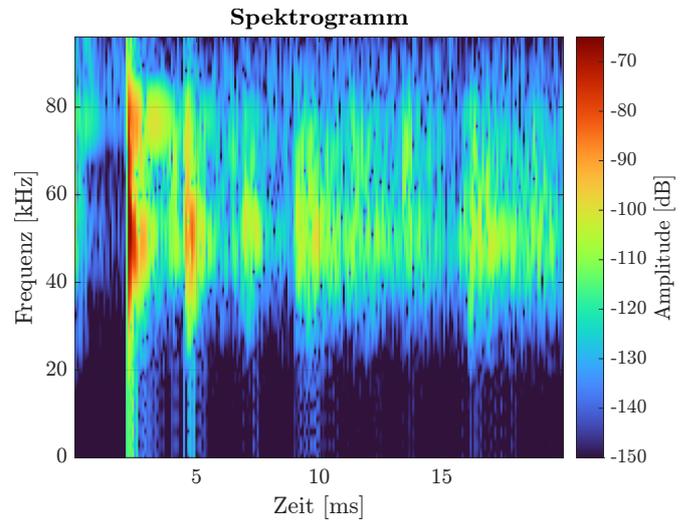
In den räumlichen Impulsantworten in Abb. 6 ist für beide Messszenarien die erste signifikante Reflexion bei ca. 1.7m zu sehen, was mit dem zuvor beschriebenen Abstand des SONAR-Systems zur Tankwand übereinstimmt. Für den ungedämmten Tank in Abb. 6(a) ist ein deutlicher Nachhall durch intensive Mehrfachreflexionen zu erkennen, welche auch im zugehörigen Spektrogramm in Abb. 7(a) zu sehen sind. Diese sind im Bereich von 40 kHz bis 80 kHz am intensivsten ausgeprägt, da der verwendete Projektor in diesem Frequenzbereich die höchste Sensitivität aufweist.

Im Vergleich dazu ergibt sich für die gedämmte Tankumgebung in Abb. 6(b) ein deutlich geringerer Nachhall. Hierdurch ergibt sich ein genaueres Abbild der eigentlichen Tankumgebung: Ausgehend vom Maximum der ersten signifikanten Reflexion ist eine ca. 5 m lange horizontale Linie zu erkennen, welche die frontale Tankwand darstellt. Die Reflexion in der rechten Ecke dieser Tankwand bei ca. $x = 2.5$ m ist deutlich reduziert im Vergleich zur gleichen Position des ungedämmten Tanks. Die Reflexionsintensität der gegenüberliegenden linken Ecke ist in beiden Abbildungen ähnlich, da diese noch nicht vollständig mit Matten gedämmt ist.

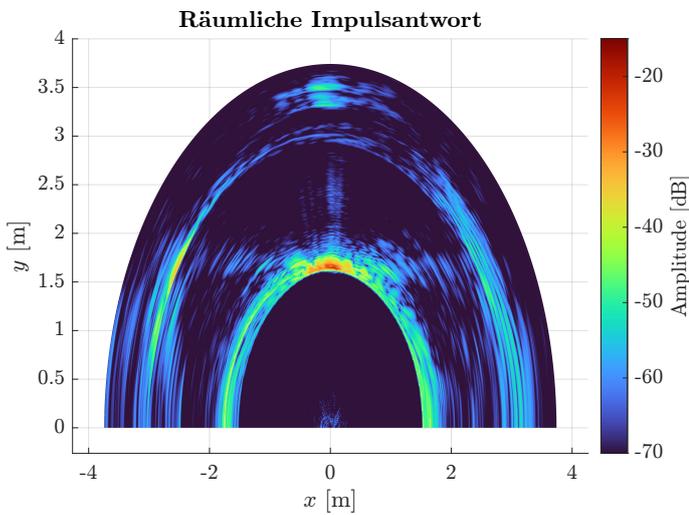
Auch im Spektrogramm in Abb. 7(b) ist eine deutliche Reduktion der Intensität der Mehrfachreflexionen und damit eine einhergehende Reduktion des Nachhalls zu erkennen. Für das in Abb. 8 dargestellte Abklingverhalten lässt sich für die gedämmte Tankumgebung ein



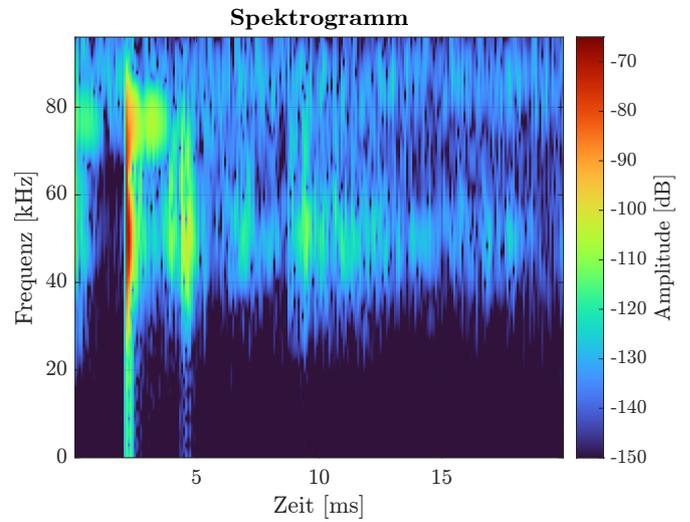
(a) Ungedämmter Tank.



(a) Ungedämmter Tank.



(b) Gedämmter Tank.



(b) Gedämmter Tank.

Abbildung 6: Räumliche Impulsantworten der Tankumgebung.

Abbildung 7: Spektrogramme der extrahierten Impulsantworten.

deutlich schnelleres Abklingen der momentanen Energie $|h(t)_{\text{Matte}}|^2$ gegenüber der ungedämmten Tankumgebung mit $|h(t)_{\text{Wand}}|^2$ beobachten. Bei genauerer Betrachtung der ersten signifikanten Reflexion lässt sich in Abb. 9 eine Reduktion der Intensität von -22 dB auf -30 dB erkennen, wodurch sich eine zusätzliche Dämpfung von 8 dB ergibt. Um die Nachhallzeiten zu bestimmen, wird wie in Abb. 9 die kumulative abklingende Energiefunktion $s(n)$ mit Hilfe der Schröder-Rückwärtsintegration [4] über die Summe

$$s(n) = 10 \log_{10} \left(\sum_{N=N_{\text{end}}}^n h^2(N) \right) [\text{dB}] \quad (2)$$

gebildet. Hierbei wurde für beide Abklingfunktionen der Startpunkt der Rückwärtsintegration N_{end} innerhalb des Rauschteppichs gesetzt. Hiermit kann die Nachhallzeit T_{20} bestimmt werden, die die benötigte Zeit angibt, bis die Energie der Impulsantwort um 20 dB abgeklungen ist. Diese wird mit der linearen Interpolationsfunktion $\text{lin}(n)_{T_{20}}$ bestimmt:

Als Startpunkt wird der Punkt festgelegt, an dem die Abklingfunktion im Vergleich zu ihrem Maximum um 5 dB gefallen ist. Der Endpunkt entspricht dem Abfall um weitere 20 dB auf -25 dB. Die Zeitdifferenz zwischen diesen beiden Punkten ergibt die Nachhallzeit T_{20} [5].

Wie in Abb. 10(a) zu erkennen ist, ergibt sich für den ungedämmten Tank eine T_{20} Zeit von ca. 77 ms, für den gedämmten Tank in Abb. 10(b) eine T_{20} Zeit von ca. 15 ms. Diese Differenz von 62 ms entspricht somit einer Reduktion der Nachhallzeit um ca. 81 %.

Ausblick

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass die Auskleidung der Tankumgebung mit akustischen Dämmmatten zu einer signifikanten Reduktion der Intensität der direkten Reflexionen und des Nachhalls geführt hat. Es ist darauf hinzuweisen, dass es sich hierbei um vorläufige Ergebnisse handelt, da die Tankumgebung noch nicht vollständig mit Dämmmatten ausgekleidet ist.

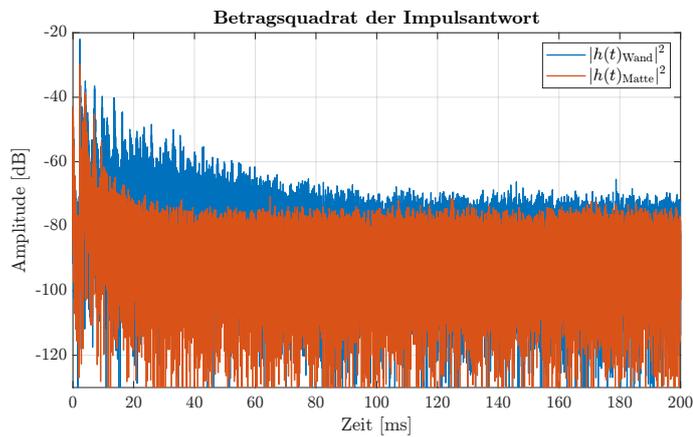


Abbildung 8: Abklingverhalten der Tankimpulsantworten.

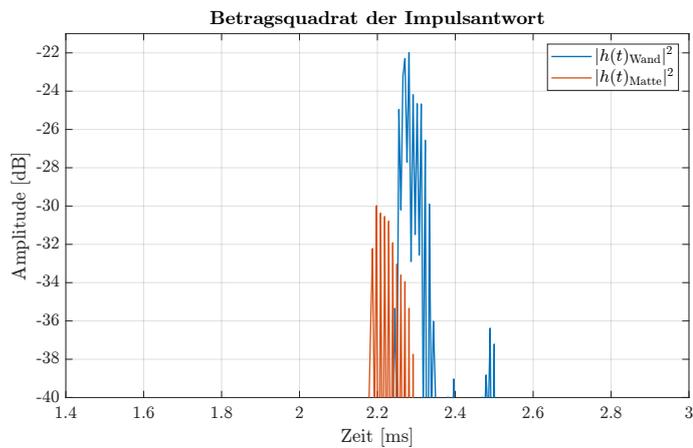


Abbildung 9: Intensitätsvergleich der ersten signifikanten Reflexion.

Nach vollständiger Auskleidung des Tanks kann in Zukunft die frequenzselektive Dämpfung der gedämmten Wände gegenüber den ungedämmten Betonwänden verglichen werden. Dazu können zusätzlich zum Referenzkanalansatz die Sende- und Empfangssignale entzerrt werden, um den Einfluss der Sensitivitäten des verwendeten SONAR-Systems zu reduzieren.

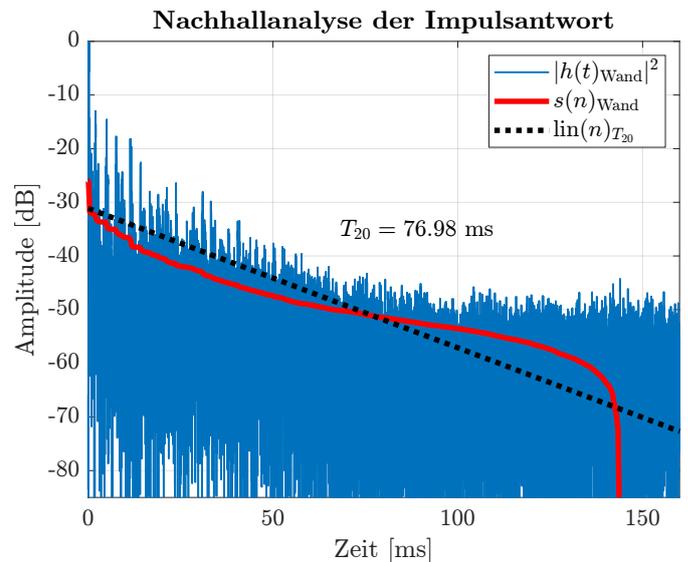
Die vollständige Auskleidung des Tanks mit Dämmmaten wird voraussichtlich zu einer weiteren Reduktion der Reflexionen und des Nachhalls im Tank führen, was in zukünftigen Studien untersucht werden muss.

Danksagung

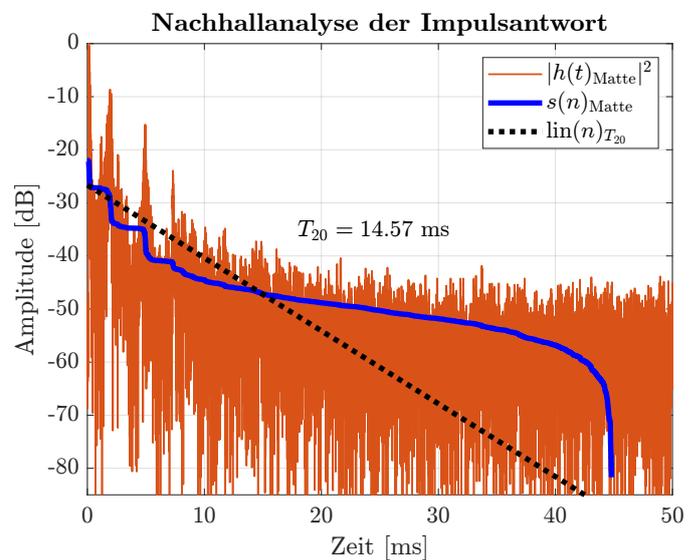
Der Erstautor wird gefördert durch die *Helmholtz School for Marine Data Science (MarDATA)*, Grant No. *HIDSS-0005*.

Literatur

- [1] Zentrum für vernetzte Sensorsysteme (ZEVS), URL: <https://www.zevs-kiel.de/>
- [2] REGUPOL playfix FX, URL: <https://sports.regupol.de/produkt/regupol-playfix-fx/>



(a) Abklingverhalten des ungedämmten Tanks.



(b) Abklingverhalten des gedämmten Tanks

Abbildung 10: Nachhallzeiten der Tankumgebungen.

- [3] Kaulen, B., & Schmidt, G. (2023). Fast and precise underwater transducer characterisation utilising adaptive system identification. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 17(7), 1160–1174. <https://doi.org/10.1049/rsn2.12409>
- [4] Schroeder, M. R. (1965). New Method of Measuring Reverberation Time. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 37(6_Supplement), 1187–1188. <https://doi.org/10.1121/1.1939454>
- [5] Rakerd, B., Hunter, E. J., Berardi, M., & Bottalico, P. (2018). Assessing the acoustic characteristics of rooms: A tutorial with examples. *Perspectives of the ASHA special interest groups*, 3(19), 8–24. <https://doi.org/10.1044/persp3.sig19.8>