Systementwicklung und -evaluation für die Kalibrierung von Kondensator-Messmikrofonen mit der Substitutionsmethode im Vergleich zu Messungen im Halbfreifeldraum

Judith Falkhofen [1,2]

[1] *Jade Hochschule IHA, 26121 Oldenburg, E-Mail: judith.falkhofen@web.de*

[2] *Bertrandt Technologie, 38524 Sassenburg*

Einleitung

Für die Erfassung des exakten absoluten Schalldruckpegels mit Kondensator- Messmikrofonen werden die Abweichungen von ihren ideal linearen Übertragungsfunktionen, sowie ihre Sensitivitäten benötigt. Messmikrofone werden dazu häufig frequenzabhängig in jährlichen Intervallen mit der Substitutionsmethode kalibriert. Als Alternative zu der Kalibrierung in einem Halbfreifeldraum wird ein kostengünstiger Aufbau eines Rohrs mit eingebautem Lautsprecher, einer Endstufe und einer Mikrofonhalterung untersucht („mobile Kalibrierbox"). Evaluiert werden Messungen im Halbfreifeldraum im Vergleich zu der neu entwickelten Kalibrierbox.

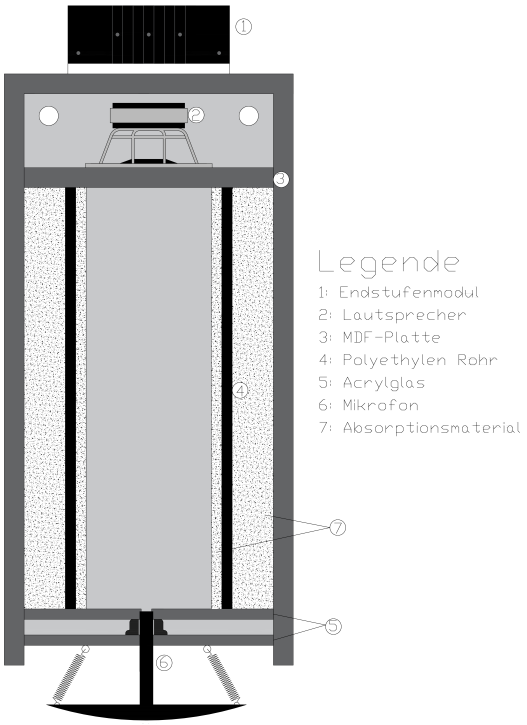


Abbildung 1: Querschnitt der Kalibrierbox mit in die Inputebene eingesetztem Mikrofon (Bemaßung aufgrund des Datenschutzes entfernt).

Ziele der Kalibrierbox

An den Entwurf der in Abbildung 1 gezeigten Kalibrierbox wurden die folgenden Anforderungen gestellt.

- **Mobilität und Kompaktheit**
- **Reproduzierbarkeit:** Anliegen des gleichen Schalldrucks an Prüf- und Referenzmikrofon durch stabile Mikrofonhalterung und einfache Reproduzierbarkeit der Messungen durch weniger fehleranfälligen Aufbau.
- **Dämmung von Störgeräuschen:** Schutz der Kalibriermessungen vor Störgeräuschen von außen.
- **Übertragungsfunktionsmessung:** Entwurf eines 2-kanaligen Kalibriersystems in Matlab zur Berechnung der Übertragungsfunktionen der Messmikrofone. Implementierung eines exponentiellen Sweep-Signals, mit dessen Hilfe die linearen Anteile berechnet werden können, sowie der Vergleich zu einer einfachen Übertragungsfunktionsschätzung mit rosa Rauschen.
- **Großes Signal-Rausch-Verhältnis (SNR):** Hoher Signalpegel, der mögliche Unsicherheiten begrenzt und ein ausgeglichenes frequenzabhängiges SNR im relevanten Frequenzbereich ermöglicht.
- **Unsicherheiten der Langzeitmessungen:** Durchführung von Langzeitmessungen zwecks Bestimmung der frequenzabhängigen Abweichungen und Einhalten der internen Toleranzgrenzen mit den Einzelabweichungen vom Langzeit-Mittelwert.

Messaufbau und Messmethoden

Die Abbildung 2 zeigt den Signalablauf mit den verwendeten Geräten in Form eines Blockschaltbildes.

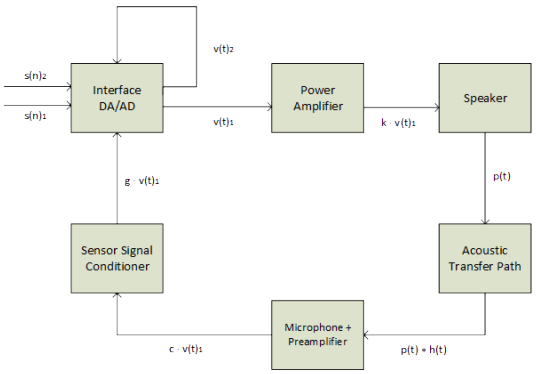


Abbildung 2: Blockschaltbild des Signalverlaufs im Kalibriersystem.

Der exponentielle Sinus-Sweep wurde nach Vorbild von Novák et al. [1], [2] implementiert. Ein Vorteil ist, dass die linearen Anteile der Übertragungsfunktion extrahiert

werden können. Zudem liegen viele Störgeräusche im tieffrequenten Bereich, welche durch passive Maßnahmen schwer zu dämpfen sind. Dort besitzt der Sweep $x(t)$ aufgrund des exponentiellen Anstiegs mehr Energie. Er ergibt sich durch einen exponentiellen Anstieg, welcher abhängig ist von L, also einem Zusammenhang aus zeitlicher Länge des Sweeps $\hat{T}$ und dem zu durchlaufenden Frequenzbereich von f_1 bis f_2.

$$x(t) = \sin\left[2\pi f_1 L \cdot \exp\left(\frac{t}{L}\right)\right] \tag{1}$$

$$L = \frac{1}{f_1} \cdot \text{round}\left[\frac{\hat{T} f_1}{\ln(f_2/f_1)}\right] \tag{2}$$

Zur Verbesserung des frequenzabhängigen SNR im Rohr wird ein Hochpassfilter erster Ordnung nach Zölzer [5] angewendet. Durch das Filter hat das Eingangssignal keine konstante Amplitude mehr, sondern wird im Zeit- und Frequenzbereich geshaped.

Das inverse Signal für die Entfaltung $\tilde{x}$ ergibt sich laut [2] aus $x(t)$ nach dem folgenden Zusammenhang.

$$\tilde{x}(t) = \frac{f_1}{L}\exp\left(-\frac{t}{L}\right) x(-t). \tag{3}$$

Sind höhere Harmonische Hm_n mit $n \in \mathbb{N}$ enthalten, so besitzen diese eine geringere Gruppenlaufzeit und treten im entfalteten Signal zeitlich vor dem Dirac-Impuls auf. Die Entfaltung des Ausgangs $y(t)$ kann durch Multiplikation im Frequenzbereich nach Formel 4 aus [1] durchgeführt werden, wodurch die Rechenzeit im Vergleich zu der Faltung im Zeitbereich deutlich verringert werden kann.

$$h(t) = y(t) * \tilde{x}(t) = \mathcal{F}^{-1}\left\{\mathcal{F}[y(t)] \cdot \mathcal{F}[\tilde{x}(t)]\right\} \tag{4}$$

Die gesamte Übertragungsfunktion ist eine Gruppe von Impulsantworten, wobei jede davon mit einer anderen Potenz des Eingangsignals gefaltet wurde [3]. Um diese Anteile zu trennen, werden sie im Zeitbereich mit einem Von-Hann-Fenster ausgeschnitten. Dazu wird zunächst das Maximum der Entfaltung im Zeitbereich gesucht. Dieses entspricht dem nach der zeitlichen Länge des Eingangsssignals auftretenden Impuls h_1. Die nichtlinearen Anteile nach der Entfaltung entstehen nach [1] an den negativen zeitlichen Verzögerungen t_n.

$$\Delta t_n = L \cdot \ln(n) \tag{5}$$

Daraufhin werden jeweils die Übertragungsfunktionen der zugehörigen linearen Filter G_m berechnet. Diese ergeben sich für die ersten drei Harmonischen aus der folgenden Formel 6 nach [2]. Die relativen Amplituden der höheren Harmonischen ermöglichen dabei auch die Überprüfung der Plausibilität durch Bestimmung des Klirrfaktors (THD+N).

$$\begin{pmatrix} G_1(f) \\ G_2(f) \\ G_3(f) \end{pmatrix} = (\mathbf{A}^T)^{-1} \begin{pmatrix} Hm_1(f) \\ Hm_2(f) \\ Hm_3(f) \end{pmatrix} \tag{6}$$

Die Matrix $\mathbf{A}$ enthält die Umrechnung zwischen den Harmonischen höherer Ordnung $\sin(xl)$ und der l-ten Potenz des harmonischen Eingangssignals $\sin(x)^l$ mit $l \in \mathbb{N}$. Bezogen auf das Blockschaltbild 2 ergibt sich die lineare Übertragungsfunktion daraufhin aus dem folgenden Zusammenhang. Für das rosa Rauschen wurden im Vergleich dazu der klassische H_1- Schätzer verwendet.

$$H_{sweep}(f) = 20\ \log_{10}\left[\frac{|G_1(g \cdot v_1)|}{|G_1(v_2)|}\right] \tag{7}$$

Bei der Substitutionsmethode wird letztendlich die Pegeldifferenz der Übertragungsfunktionen zwischen Prüf- und Referenzmikrofon gesucht. Um diese zu bestimmen, können als Basis sowohl die geglätteten schmalbandigen Übertragungsfunktionen beider Mikrofone, als auch die berechneten Terzbandenergien verwendet werden. Die Abweichungen ergeben sich aus dem Verhältnis der Übertragungsfunktionen bzw. der Pegeldifferenz.

$$H_{diff}(f) = 20\ \log_{10}\left(\frac{H_{\text{pruef}}(f)}{H_{\text{ref}}(f)}\right) \tag{8}$$

Funktionale Frequenzbereiche

Basierend auf den Längsresonanzen f_n des Rohres mit dem Radius a bei angenommenen schallhartem Abschluss, sowie den Grenzfrequenzen von Moden höherer Ordnung nach [4]

$$f_{n,m} = \frac{k_{\text{n,m}}\ c}{a \cdot 2\pi} \tag{9}$$

und mit den tabellierten Nullstellen der Ableitung der Besselfunktion $k_{n,m}$ kann die Übertragungsfunktion in drei zu erwartende Frequenzbereiche eingeteilt werden. Diese geben Aufschluss über das frequenzabhängig zu erwartende SNR. Zu niedrige Werte gehen dabei mit verhältnismäßig größeren auftretenden Störgeräuschen, einem erhöhten THD+N, sowie mit einer vergrößerten Unsicherheit der Einzelmessung gegenüber dem Mittelwert einher. Abbildung 3 zeigt die mittlere Übertragungsfunktion des Sweeps und des rosa Rauschens.

- $f < f_1$: **Kolbenmode des Lautsprechers**: Entstehender Schalldruck wird durch die Anregungseigenschaften des Lautsprechers und die Nachgiebigkeit des angekoppelten Luftvolumens bestimmt.

- $f \geq f_1$: **λ/2-Resonator**: Ausbildung von Längsresonanzen im Rohr.
- $f > f_{0,1}$: **Moden höherer Ordnung**: Zusätzliche Abhängigkeit von den Moden höherer Ordnung in Richtung des Rohrradius, sowie deren Dämpfung.

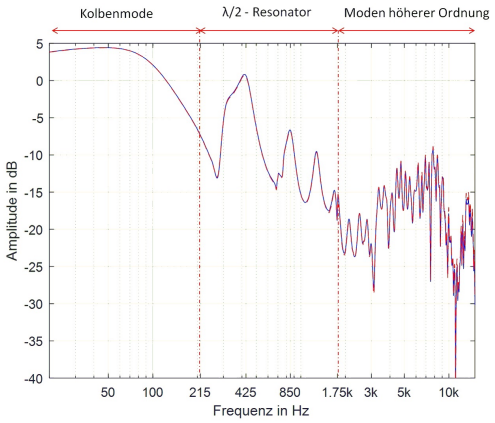


Abbildung 3: Gemessene mittlere Übertragungsfunktion mit funktionalen Frequenzbereichen. Mittelwerte aus 80 Messungen mit Sweep (H_{sweep}, blau) und rosa Rauschen (H_1, rot gestrichelt) in der Kalibrierbox.

Ergebnisse

Für das gleiche Mikrofon wurden Langzeitmessungen über einen Zeitraum von zwei Monaten durchgeführt. In Abbildung 5 sind die Ergebnisse der Kalibrierbox im Vergleich zu den Messungen im Halbfreifeldraum in Abbildung 4 zu sehen.

Interessant ist, dass die Messungen im Halbfreifeldraum stark vom jeweiligen Messtag abhängig waren, da bei einem erneuten Messaufbau der Schalldruckpegel mit großer Wahrscheinlichkeit abwich. Dazu führten Verschiebungen des Lautsprechers in der Vertiefung des Wandabsorbers, des Mikrofons über der Lautsprechermembran, Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Luftfeuchte oder auftretende Reflexionen. Die Abweichungen um 60 Hz können auf die Grenzfrequenz des Lautsprechers zurückzuführen sein, bei der einzelne Überschwinger aufgrund veränderlicher Gesamtgüte, z.B. durch Veränderungen im Magnetfeld der Spule, auftreten.

Bei der Kalibrierbox weichen die Messungen deutlich weniger von ihrem Mittelwert ab. Die Vorteile liegen besonders im Frequenzbereich vor der ersten Antiresonanz. Das Ziel eines hohen und zeitlich invarianten Signalpegels, welcher Unsicherheiten begrenzt, konnte somit tieffrequent erfüllt werden. Die Messungen sind daher besser reproduzierbar und weniger fehleranfällig. Einen Einfluss haben jedoch die gemessenen Antiresonanzen im Bereich des λ/2-Resonators. Die Moden höherer Ordnung bewirken zudem eine Erhöhung der Abweichungen ab der ersten nicht achsensymmetrischen Mode höherer Ordnung bei 1,75 kHz. Die geringere hochfrequente Energie resultiert zum einen aus der mit der Frequenz steigenden Dämpfung und zum anderen aus dem Energieverlust durch Moden höherer Ordnung.

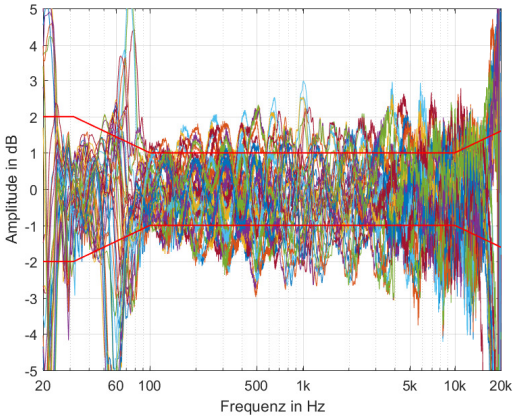


Abbildung 4: Pegeldifferenzen der Einzelmessungen zu ihrem gemeinsamen Mittelwert für die bisherige Methode aus 80 Messungen im Halbfreifeldraum.

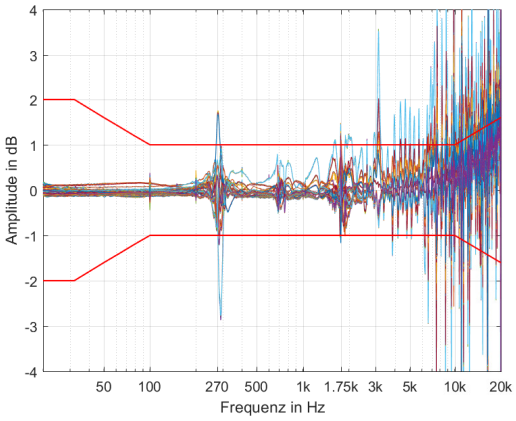


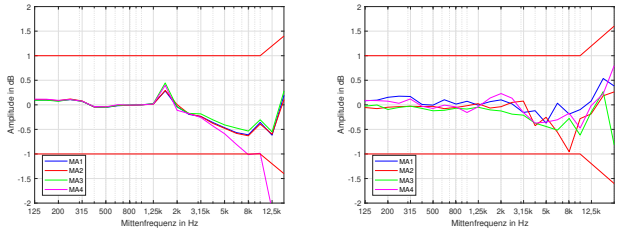
Abbildung 5: Pegeldifferenzen der Einzelmessung zu ihrem gemeinsamen Mittelwert aus 120 Übertragungsfunktionen H_{sweep} gemeinsam mit dem internen Toleranzschlauch (rot).

In Tabelle 1 sind die Unsicherheiten aus den Langzeitmessungen aufgelistet. In der Kalibrierbox sind diese im gesamten Frequenzbereich geringer und liegen bis zu 4 kHz innerhalb der internen Toleranzgrenzen.

Zusätzlich wurden Kalibrierungen anhand der Differenzen der Terzbandenergien zwischen Prüf- und Referenzmikrofon am selben Tag von verschiedenen Anwendern durchgeführt (Abbildung 6). In der Berechnung sind die bekannten inhärenten Abweichungen des Referenzmikrofons berücksichtigt. Das Ergebnis ist die Grundlage für die Bewertung, ob das Prüfmikrofon weiter verwendet werden kann. Die Ergebnisse im Halbfreifeldraum und der Kalibrierbox stimmen bezüglich des vorliegenden Trends überein. Jedoch konnten in der Kalibrierbox vor allem im Bereich von der Mittenfrequenz 20 Hz bis 3 kHz stabilere Ergebnisse erreicht werden. Über diesem Frequenzbereich weichen die Messungen in Einzelfällen voneinander ab (siehe MA4). Dies ist auf die bereits erörterten Resonanzerscheinungen zurückzuführen, welche die Varianz vergrößern.

Tabelle 1: Erweiterte Unsicherheitsbeiträge ± U(x), k=2 der Übertragungsfunktionen H_{sweep} unterteilt in vier verschiedene Frequenzbereiche

Freq. [Hz]	Unsicherheitsbeiträge (k=2)	
	Kalibrierbox	Halbfreifeldraum
20 - 200	0,17	1,32
200 - 2k	0,43	1,10
2k - 4k	0,63	1,17
4k - 10k	1,12	1,24



(a) (b)

Abbildung 6: Vergleich der Kalibrierbox (a) und des Halbfreifeldraums (b) anhand desselben Mikrofons für die Mitarbeiter M1-M4.

Fazit und Diskussion

Es wurden zwei Signale für die Bestimmung der Pegeldifferenz zwischen den Übertragungsfunktionen von Prüf- und Referenzmikrofon implementiert. Die Entfaltung des Sweeps im Frequenzbereich ist in dieser Anwendung, aufgrund eines besseren frequenzabhängigen SNR, der Möglichkeit der Analyse der Nichtlinearitäten und der größeren Anzahl vorliegender Samples und somit einem geringeren auswertbaren Terzband, sinnvoller als der H_1-Schätzer mit rosa Rauschen.

Die stabile Position der Mikrofone in der Inputebene ist im Vergleich zur bisherigen Methode durch eine bessere Reproduzierbarkeit und einen zeitsparenden Aufbau ein großer Vorteil. Die Kalibrierbox hat im Frequenzbereich von 20 Hz bis 3 kHz besser reproduzierbare Ergebnisse für die Berechnung der Pegeldifferenzen zwischen Prüf- und Referenzmikrofon erzielt. Jedoch führen auftretende Antiresonanzen zu Messunsicherheiten. Daher wurde der auswertbare Frequenzbereich hochfrequent begrenzt.

Um den Frequenzbereich zukünftig mit geringen Messunsicherheiten zu erweitern, empfiehlt es sich Rohrabmessungen zu wählen, in denen sich ebene Wellen ausbreiten. Bei dem Entwurf eines solchen Rohres sollte auf zwei Bedingungen geachtet werden, die die Entstehung von Antiresonanzen mit ihrer Pegelverringerung durch Interferenzen und Dämpfungen im auszuwertenden Frequenzbereich betreffen:

- geringerer Rohrdurchmesser, der sich an der Grenze der Entstehung von Quermoden orientiert,
- kürzeres Rohr, wodurch die untere Grenze für die Entstehung von Längsresonanzen in einen höheren Frequenzbereich verschoben wird.

Insgesamt funktioniert das Kalibriersystem schneller und somit kostengünstiger und zeichnet sich zudem tieffrequent durch weniger Unsicherheiten aus. Der mechanische Aufbau und die Lage des Mikrofons im Mittelpunkt der Rohrachse führten jedoch zu komplexen akustischen Eigenschaften und gegenseitigen Abhängigkeiten im Frequenzbereich. Diese waren bezüglich der Betrachtung über einen langen Zeitraum in der Summe allerdings weniger relevant für die Reproduzierbarkeit, als die stabile Mikrofonposition relativ zur Schallquelle, die breitbandig ein hohes SNR gewährleistet.

Literatur

[1] Novák, A., Lotton, P. and Simon, L.: Synchronized Swept-Sine: Theory, Application and Implementation. AES (2015), Vol. 63, No. 10.

[2] Novák, A., Simon, L. and Kadlec, F. and Lotton, P.: Nonlinear System Identification Using Exponential Swept-Sine Signal. IEEE Transactions on instrumentation and measurement (2010), Vol. 59, No. 8.

[3] Farina, A.: Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique (2000), AES Convention No. 108.

[4] Jacobsen, F.: Propagation of sound waves in Ducts. Technical University of Denmark, 2000.

[5] Zölzer, U.: DAFX: Digital Audio Effects, Second Edition. John Wiley and Sons, Ltd., Publication, Helmut Schmidt University, Hamburg, Germany, 2011.