

Sekundärkalibrierung von Messmikrofonen und Schallpegelmessern im Infrasschall-Frequenzbereich

Marvin Rust¹, Christoph Kling¹

¹ *Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, Deutschland, Email: marvin.rust@ptb.de*

Einleitung

Pegelmessungen von Infrasschall gewinnen im praktischen Einsatz immer mehr an Bedeutung, zum Beispiel bei der Überwachung von starken Erschütterungen, wie sie von Vulkanausbrüchen ausgelöst werden, oder bei der Messung von tieffrequenten Umgebungsgläuschen. Dabei wird der Frequenzbereich unter 10 Hz von den vorhandenen Messverfahren und den anzuwendenden Normen bisher nur unzureichend abgebildet. Gleichzeitig existiert keinerlei Rückführung auf nationale Normale. Aus diesem Grund widmet sich das Projekt Infra-AUV "Metrology for low-frequency sound and vibration" [1] des European Metrology Program for Innovation and Research (EMPIR) der Entwicklung der gesamten Rückführungskette vom Primärstandard bis hin zum Schallpegelmessers für die Anwendung im Feld.

In dieser Arbeit wird speziell die Weitergabe der Einheit Pascal im Frequenzbereich unter 10 Hz von einem Primärstandard auf Schallpegelmessers, Labor- und Gebrauchsmikrofone behandelt. Dafür wird ein Komparationsverfahren in einem geschlossenen Luftvolumen vorgestellt und erörtert. Es erlaubt die Sekundärkalibrierung von Mikrofonen und Schallpegelmessern im Frequenzbereich zwischen 0,5 Hz und 100 Hz mit einer Wiederholbarkeit von weniger als 3/100 dB. Es werden Beispiele vorgestellt, die deutlich machen, dass so eine präzise Weitergabe der Einheit Pascal im Infrasschallbereich für Messungen insbesondere im gesetzlich geregelten und geschäftlichen Bereich möglich ist.

Funktionsprinzip

Der vorgestellte Messplatz basiert auf dem Komparationsprinzip. Dabei werden die Prüflinge und das Referenzmikrofon gleichzeitig einem Schallfeld in einem geschlossenen Volumen ausgesetzt. Aus dem Vergleich der Ausgangssignale von Referenz und Prüfling ergibt sich die Empfindlichkeit des Prüflings. Um mögliche systematische Differenzen im Schallpegel zwischen den Orten von Referenzen und Prüflingen erkennen zu können, werden deren Positionen nach einem Messdurchlauf getauscht und es werden mehrere Messdurchläufe nacheinander durchgeführt.

Als Anregungssignal kommt ein Sinuston zum Einsatz, der über einen Lautsprecher ein Schallfeld mit sinusförmiger Amplitude in dem geschlossenen Volumen erzeugt.

Sowohl die Erzeugung des Anregungssignals als auch

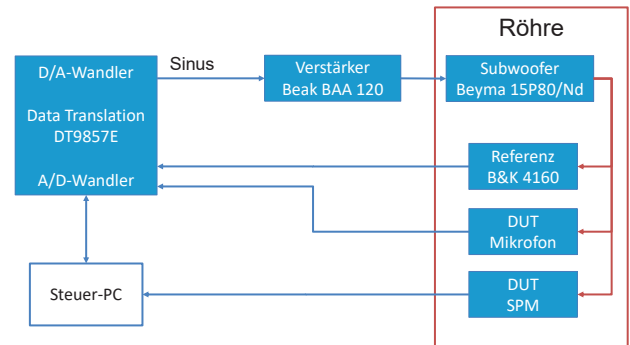


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Messplatzes. Blaue Pfeile kennzeichnen elektrische Signale, rote Pfeile kennzeichnen akustische Signale.

die Aufnahme der Ausgangsspannungen erfolgt mithilfe eines kombinierten Digital-Analog- und Analog-Digital-Wandlers. Abbildung 1 zeigt schematisch den Signalfluss im Messaufbau. Die Datenaufnahme erfolgt dabei im Zeitbereich.

Zusätzlich zum hier verwendeten Komparationsprinzip wurde auch ein Messaufbau auf Basis des Substitutionsprinzips verwendet, bei dem Referenz und Prüfling nacheinander am selben Ort im Schallfeld vermessen werden. Im hier betrachteten Aufbau sind allerdings die zeitlichen Pegelschwankungen des Anregungssignals deutlich größer als die räumlichen Differenzen des Schallpegels zwischen den Messorten von Prüflingen und Referenzen. Daher liefert das Komparationsverfahren hier zuverlässigere Ergebnisse mit kleinerer Messunsicherheit.

Messaufbau

Ein Messplatz nach dem beschriebenen Prinzip wurde in der PTB als Laboraufbau realisiert, siehe Abbildung 2. Das geschlossene Volumen ist dabei als Acrylglasschale mit einem Durchmesser von 30 cm und einer Höhe von 110 cm realisiert. Diese Abmessungen sind ausreichend groß, um auch größere Messgeräte wie Schallpegelmessers oder wetterfeste Außenmikrofone im Messplatz kalibrieren zu können. Ein Lautsprecher am Boden der Röhre bildet die Anregungsquelle, während alle Prüflinge und Referenzen im oberen Bereich in der Nähe des schallharten Deckels der Röhre montiert werden.

Im Deckel selber sind außerdem verschiedene Halterungen für Messmikrofone installiert, die ein bewusstes



Abbildung 2: Messaufbau zur Sekundärkalibrierung von Messmikrofonen und Schallpegelmessern im Infraschallbereich. Die Anregungsquelle befindet sich am Boden der Acrylglasröhre, Referenz und Prüfling im Bereich des Deckels.

Platzieren der rückseitigen Ausgleichsöffnung der Mikrofone im Schallfeld oder außerhalb des Schallfeldes erlauben. Dies ist erforderlich, da die Ausgleichsöffnung ein mechanisches Hochpassfilter darstellt, sofern sie dem Schallfeld ausgesetzt wird. Der Frequenzgang eines Messmikrofons ist bei tiefen Frequenzen daher stark von der Lage der Ausgleichsöffnung abhängig [2]. Die zur Kalibrierung des Referenzmikrofons verwendete Druckreziprozitätsmethode wird zum Beispiel mit einer nicht dem Schallfeld ausgesetzten Ausgleichsöffnung durchgeführt, weswegen das Referenzmikrofon auch im hier betrachteten Messplatz mit der Ausgleichsöffnung außerhalb des Schallfeldes montiert werden muss.

Der Aufbau der Röhre ist darauf optimiert, dass das Schallfeld, dem Referenz und Prüfling ausgesetzt sind, über einen möglichst großen Frequenzbereich homogen ist. Pegelabfälle durch destruktive Interferenz bilden sich bei steigender Frequenz zuerst im unteren Teil der Röhre aus, während das Schallfeld im oberen Bereich der Röhre stabil bleibt. Unterhalb von 100 Hz ist das Schallfeld im oberen Bereich der Röhre hinreichend homogen, sodass eine Kalibrierung in diesem Frequenzbereich mit niedriger Unsicherheit möglich ist.

Die untere Frequenzgrenze des Messplatzes ist durch einen Abfall im Schalldruckpegel gegeben: Unterhalb von 2 Hz sinkt der Schallpegel der Anregungsquelle

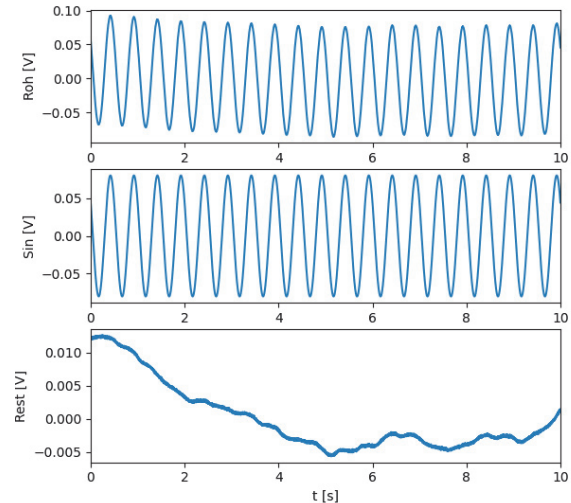


Abbildung 3: Darstellung der Auswertung mittels Fourier-Koeffizienten. Oben: Rohsignal, Mitte: Rekonstruiertes Sinus-Signal, Unten: Restsignal.

durch Undichtigkeiten des Messplatzes ab, sodass das Anregungssignal unterhalb von 0,5 Hz nicht mehr stark genug ist, um ein wiederholbares Messergebnis zu gewährleisten. Allerdings sind die bisher verwendeten Referenzmikrofone vom Typ Brüel & Kjær 4160 erst ab 2 Hz aufwärts kalibriert, da die genutzte Druckreziprozitätsmethode aus praktischen Gründen bisher keine Kalibrierung bei tieferen Frequenzen erlaubt. Im Frequenzbereich von 0,5 Hz bis 2 Hz sind daher mangels Alternativen keine absoluten Kalibrierungen sondern nur Relativmessungen möglich.

Auswertung

Die Aufnahme der Messdaten erfolgt mit einem Analog-Digital-Wandler im Zeitbereich. Die Aufnahmelänge wird dabei so gewählt, dass sie ein Vielfaches der Periodendauer des jeweiligen Anregungssignals beträgt. Damit ist es möglich, die Frequenz und Phase des Sinussignals über die entsprechenden Fourierkoeffizienten aus den Rohdaten direkt im Zeitbereich zu rekonstruieren. Abbildung 3 zeigt exemplarisch die Rekonstruktion eines Sinussignals mit einer Frequenz von 2 Hz aus dem dazugehörigen Rohdatensignal.

Für die Kalibrierung von Messmikrofonen und anderen Signalaufnehmern mit Analogausgang werden auf diese Weise die Ausgangsspannungen von Prüfling und Referenz bestimmt. Aus dem Vergleich dieser Ausgangsspannungen U_{Ref} und U_{DUT} ergibt sich die Empfindlichkeit S_{DUT} des Prüflings in V/Pa zu

$$S_{DUT} = S_{Ref} \cdot \frac{U_{DUT}}{U_{Ref}}, \quad (1)$$

wobei S_{Ref} die bekannte Empfindlichkeit des Referenzmikrofons ist. Abbildung 4 zeigt exemplarisch das Ergebnis der Kalibrierung einer Mikrofonskapsel. Die drei

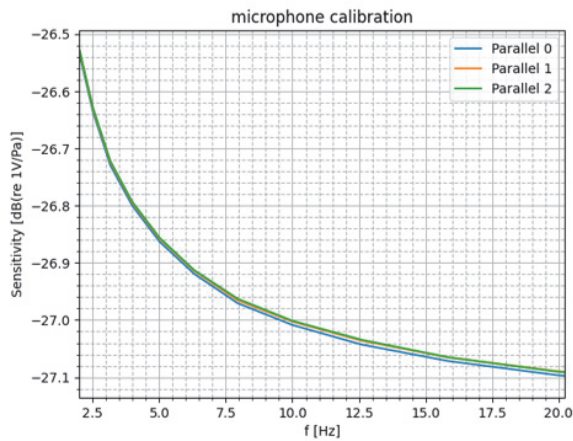


Abbildung 4: Kalibrierergebnis eines Einzoll-Mikrofons mit Ausgleichsöffnung außerhalb des Schallfeldes. Die einzelnen Kurven zeigen mehrere Messdurchläufe an einem Messtag.

Messkurven sind dabei direkt nacheinander entstanden, wobei die Positionen von Referenz und Prüfling in der Röhre nach jedem Messdurchlauf verändert wurden.

Bei der Kalibrierung von Schallpegelmessern wird der vom Prüfling angezeigte nicht frequenzgewichtete Schallpegel L_{SPM} direkt vom Steuer-PC des Messplatzes ausgelesen und mit dem Ausgangssignal der Referenz verglichen. Die Kalibriergröße ist dabei die Abweichung der Anzeige zum tatsächlichen Pegel ΔL_p in dB . Diese ergibt sich zu

$$\Delta L_p = L_{SPM} - 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{U_{Ref}}{S_{Ref} \cdot 20 \mu Pa} \right) \quad (2)$$

und beträgt idealerweise 0 dB.

Ausblick

Für die Kalibrierung von Messmikrofonen soll zusätzlich zu dem hier vorgestellten Messplatz ein kleinerer Aufbau nach demselben Prinzip eingerichtet werden, der eine einfachere Kalibrierung von kleinen Messaufnehmern erlaubt.

Um auch im Frequenzbereich unter 2 Hz Absolutmessungen durchführen zu können, wird ein Primärmessverfahren entwickelt und als Messplatz realisiert, das auf dem Gradienten des barometrischen Drucks mit der Höhe basiert und auch für tiefere Frequenzen eine Primärkalibrierung mit einer geringen Unsicherheit ermöglichen soll.

Danksagung

This project has received funding from the EMPIR programme co-financed by the Participating States and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme.

We gratefully acknowledge the support of the Braunschweig International Graduate School of Metrology B-IGSM.

Literatur

- [1] Metrology for low-frequency sound and vibration 19ENV03 Infra-AUV, URL: <https://www.ptb.de/empir2020/infra-auv/home/>
- [2] Milhomem, Thiago Antonio and M. Defilippo Soares, Zemar: Low frequency calibration of measurement microphones. IX Congresso Brasileiro de Metrologia (2017)