

Frequenzkammverfahren zur Messung von Schalldruckpegeldifferenzen bei sehr tiefen Frequenzen

Marius Benkert¹, Matthias Blau^{1/2}, Volker Wittstock³

¹ Jade Hochschule Oldenburg, Deutschland, Email: marius.benkert@gmx.de

² Cluster of Excellence „Hearing4All“

³ Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Deutschland, Email: volker.wittstock@ptb.de

Einleitung

Anlagen zur Energieerzeugung (Windkraftanlagen, Blockheizkraftwerke) sind Quellen von sehr tieffrequentem Schall und es kann festgestellt werden, dass die Anzahl dieser Anlagen durch die Dezentralisierung der Energieerzeugung stetig zunimmt und somit auch die dadurch entstehende Lärmbelastung [1]. Infolgedessen ist es interessant, die Schalldämmung von bestehenden Gebäuden gegenüber tieffrequentem Schall zu ermitteln. In der aktuellen Norm DIN EN ISO 16283-3 [2] ist für die Messung der Schalldruckpegeldifferenz oder des Bau-Schalldämm-Maßes eine untere Frequenzgrenze von 50 Hz angegeben. Für die Ermittlung der tieffrequenten Lärmbelastung muss dieser Frequenzbereich zu tieferen Frequenzen erweitert werden, was bedeutet, dass eine Lösung für die zu tiefen Frequenzen abnehmende Sendeleistung von Lautsprechern gefunden werden muss. Es wird vorgeschlagen, das Problem durch die Nutzung eines Multisinussignals zu lösen, wodurch der erreichbare Signal-Rausch-Abstand vergrößert werden könnte. Multisinussignale haben in der Vergangenheit bereits Anwendungen gefunden (z.B. [3]). Für den aktuellen Anwendungsfall muss geklärt werden, 1) wie die Messung der Schalldruckpegeldifferenz mit einem Multisinus durchgeführt wird, 2) ob die damit gemessene Schalldruckpegeldifferenz vergleichbar mit der mit etablierten Messsignalen Rauschen und Sweep gemessenen Schalldruckpegeldifferenz ist und 3) ob der erreichbare SNR unter Verwendung eines Multisinussignals erhöht werden kann. Diese Forschungsfragen wurden anhand von Messungen im Modellmaßstab untersucht.

Messung der Schalldruckpegeldifferenz

Für tieffrequenten Schall gilt die Annahme eines diffusen Schallfeldes nicht. Somit ist die Ermittlung der äquivalenten Schallabsorptionsfläche über die Messung der Nachhallzeit nicht sinnvoll und die Bestimmung des Bau-Schalldämm-Maßes ebenso nicht. In dieser Untersuchung wird daher lediglich die Schalldruckpegeldifferenz zwischen einem Mikrofon auf der Fassade und mehreren Mikrofonen im Inneren des Raumes nach

$$\Delta L = L_{1,s} - L_2 - 1,5 \text{ dB} \quad (1)$$

betrachtet. Hierbei beschreibt $L_{1,s}$ den mittleren Außenschalldruckpegel an der Prüfoberfläche und L_2 den energetisch gemittelten Schalldruckpegel in einem Raum. Der

Abzug von 1,5 dB wurde aus der Norm DIN EN ISO 16283-3 übernommen.

Messung der Schalldruckpegeldifferenz mit Rauschen

Für die Messung mit Rauschen wird innen sowie außen ein Terzpegelspektrum gemessen. Die Terzpegelspektren aus dem Inneren werden dann gemittelt und im Anschluss wird über (1) die Pegeldifferenz bestimmt.

Messung der Schalldruckpegeldifferenz mit Sweep

Für die Messung der Schalldruckpegeldifferenz mittels Sweep wird in der Norm DIN EN ISO 18233 [4] ein Vorgehen für die Auswertung bzw. Signalverarbeitung beschrieben. Es wird beschrieben, dass nach der Messung mit dem Sweep die Entfaltung mit dem inversen, elektrischen, fouriertransformierten Sweep geschieht, um dann nach einer IFFT die breitbandige Impulsantwort zu erhalten. Diese kann dann gefiltert (Terz-/Oktav-/...-Filter) und nach

$$\Delta L = 10 \lg \left(\frac{\int h_{\text{out}}(t)^2 dt}{\int h_{\text{in}}(t)^2 dt} \right) \text{ dB} \quad (2)$$

zu einer Pegeldifferenz verrechnet werden. Dabei ist $h_{\text{out}}(t)$ die mit dem Fassadenmikrofon gemessene, gefilterte Impulsantwort und $h_{\text{in}}(t)$ die gefilterte Impulsantwort aus dem Inneren. Für die Durchführung werden bezüglich der Aspekte: Sweepdauer, Erzeugung des Sweeps (Bandbreite, Färbung des Spektrums), Länge, Entfaltung, Störspannungsabstand und zeitliche Unveränderlichkeit Empfehlungen oder Anwendungshinweise gegeben. Darüber hinaus wurden folgende Aspekte näher untersucht:

- Auswahl des Sweeps
- Berechnung des inversen Sweeps
- Fensterung der Impulsantwort und automatische Bestimmung von Onset und Ende
- Berücksichtigung von Nichtlinearitäten

Für die Messungen wurde ein von Novák et al. [5] entwickelter, exponentieller Sweep verwendet, der so konzipiert ist, dass Nichtlinearitäten in Form von ganzzahligen Potenzen bei bestimmten Zeitpunkten vor $t = 0$ s

phasenrichtig auftreten [5]. Als inverser Sweep wurde der von Novák et al. beschriebene, analytisch berechnete inverse Sweep mit einer zusätzlichen Korrektur der Randbereiche verwendet. Der Vergleich mit der Verwendung des invertierten, elektrischen Sweeps zeigte, dass die resultierende Abklingkurve mit dem analytischen Sweep deutlich artefaktfreier als die aus der Multiplikation mit dem invertierten elektrischen Signal berechnete Impulsantwort ist. Für die Bestimmung des Onsets wurde eine auf dem Spektrum basierende Methode verwendet, die die Energie der Spektren in Zeitfenstern vor Beginn der Impulsantwort für die Detektion nutzt. Das Verfahren ist als D_s in [6] beschrieben. Um das Ende der terzbandgefilterten Impulsantworten zu bestimmen, wird zunächst eine Exponentialfunktion an die Abklingkurve angepasst. Im nächsten Schritt wird der Schnittpunkt mit dem geschätzten Fremdgeräusch gesucht und dies als Ende verwendet. Das Verfahren wurde zudem an einen RMS-Detektor gekoppelt, der die gefundene Grenze iterativ anpasst, wenn der RMS in einem Zeitfenster von 1000 Samples rechts von der Grenze noch nicht dem RMS zum Zeitpunkt $t = 1$ s entspricht. Diese Anpassung soll keine allgemeine Empfehlung sein, funktionierte jedoch für die gemessenen Impulsantworten gut und war notwendig, da der Originalalgorithmus das Ende zum Teil zu früh setzte. Bezogen auf die Nichtlinearitäten wurde festgestellt, dass für den betrachteten Frequenzbereich eine Berücksichtigung keinen großen Einfluss zeigte.

Messung der Schalldruckpegeldifferenz mit einem Multisinus

Multitonsignale werden durch eine Überlagerung von endlich vielen Sinus- bzw. Cosinusschwingungen nach

$$x(n) = \sum_{k=1}^N A_k \sin(2\pi f_k t + \phi_k) \quad (3)$$

$$f_k = f_0 + (k-1) \cdot \Delta f \quad (4)$$

$$A_k = a_k \cdot 1/N \quad (5)$$

gebildet [7]. Hierbei bezeichnet N die Anzahl der Einzelschwingungen, k die Nummer der Oberschwingung, A_k die Amplitude der k -ten Oberschwingung, f_k die Frequenz des k -ten Signalanteils und ϕ_k die Phase der k -ten Schwingung. f_k wird aus der unteren Grenzfrequenz f_0 und dem Abstand zwischen zwei spektralen Peaks Δf gebildet. Die Amplitude A_k wird aus einer individuellen Amplitude a_k je Schwingung und dem Term $1/N$ gebildet, der das resultierende Signal auf die Amplitude 1 normiert, falls die maximale Amplitude $a_k = 1$ gewählt wird.

Die Startphase der Frequenzkomponenten kann entweder konstant Null, zufällig oder deterministisch nach Schröder über

$$\phi_k = \phi_1 - 2\pi \sum_{l=1}^{k-1} (k-l)p_l \quad (6)$$

festgelegt werden [8]. ϕ_k ist die Startphase des k -ten Sinussignals, ϕ_1 ist die Phase des ersten Sinussignals und p_l beschreibt die Energieverteilung im Spektrum. Für ein flaches Spektrum ist $p_l = 1/N$ und die Definition der Schröder-Phase vereinfacht sich zu

$$\phi_k = \phi_1 - \frac{\pi k^2}{N} \quad (7)$$

[8]. Die Wahl der Startphasen beeinflusst im Wesentlichen die Verteilung der Signalenergie im Zeitbereich. Für die Implementierung wurde hier eine Schröder-Phase verwendet. Abbildung 1 zeigt beispielhaft den namensgebenden Frequenzkamm, also das Betragsspektrum eines Multisinusignals mit einem Peakabstand von $\Delta f = 10$ Hz.

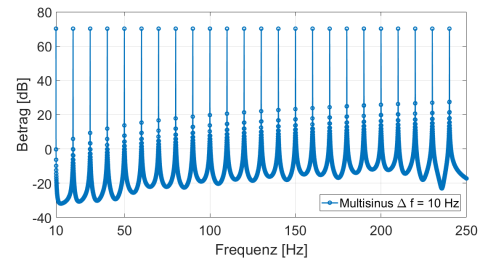


Abbildung 1: Betragsspektrum eines Multisinusignals mit einem Peakabstand von $\Delta f = 10$ Hz.

Analyse eines Multisinus

Da ein Multisinusignal ein periodisches Signal ist, ist das beste Analysefenster ein auf die Periodendauer angepasstes Rechteckfenster. Zwischen den spektralen Peaks befindet sich keine Signalenergie, weshalb über diese spektralen Lücken eine Fremdgeräuschschätzung vorgenommen werden kann. Damit dies gelingt, müssen sich genug FFT-Bins zwischen zwei Peaks befinden. Dies ist ebenfalls über das Analysefenster einstellbar:

$$m = \frac{fs}{\Delta f} + n\text{Bins} \frac{fs}{\Delta f} \quad (8)$$

Dabei ist m die Fensterlänge, fs die Samplingrate, Δf der Abstand zwischen zwei Peaks beim Multisinus und $n\text{Bins}$ die Anzahl an FFT-Bins zwischen zwei Peaks im Spektrum des Multisinus. Um von den gegebenen Größen fs und Δf auf die minimale Fensterlänge m_{\min} und FFT-Binanzahl zu kommen, kann (8) als

$$\frac{m_{\min}}{1 + n\text{Bins}} = \frac{fs}{\Delta f} \quad (9)$$

geschrieben werden, wobei aus der Dezimalzahl $fs/\Delta f$ ein Bruch mit ganzzahligem Nenner und Zähler bestimmt werden muss. Die Größen $n\text{Bins}$ und m können dann über Multiplikation mit ganzzahligen Faktoren beliebig skaliert werden.

Bestimmung des Fremdgeräuschs bei der Messung mit einem Multisinusignal

Wird mit einem Multisinusignal gemessen, kann das Fremdgeräusch aus den Lücken zwischen den Signalpeaks

im Frequenzbereich geschätzt werden. Die Bestimmung erfolgt im Frequenzbereich, nach der Fensterung mit einem geeigneten Rechteckfenster und an dem Pegelspektrum. Für die Bestimmung des Fremdgeräuschspektrums wird der Bereich zwischen je zwei Signalpeaks gemittelt, wobei ein Bereich um jeden Peak als Sperrbereich nicht mit in die Mittelung eingeht. Der Grund dafür ist, dass es trotz korrekter Fensterung eine Verbreiterung der Peaks zu höheren Frequenzen gibt. Als Ursache wird ein Jitter in der Signalaufnahme- oder Wiedergabekette vermutet. Der Sperrbereich wurde auf $n\text{Bins}/4$ festgelegt. Im nächsten Schritt werden je zwei benachbarte Bereiche mit gemittelten Pegeln durch eine Gerade verbunden. Über diese Interpolation kann auch das Fremdgeräusch an der Frequenz der Signalpeaks geschätzt und eine Fremdgeräuschkorrektur nach

$$L_{\text{corr}} = 10 \lg \left(10^{L_{\text{peak}}/10} - 10^{L_{\text{noise}}/10} \right) \text{ dB} \quad (10)$$

durchgeführt werden. Hierbei sind L_{corr} der korrigierte Pegel, L_{peak} der Pegel vor der Korrektur und L_{noise} der Pegel des geschätzten Fremdgeräuschs bei der jeweiligen Peak-Frequenz.

Verfahren zur Messung der Schalldruckpegeldifferenz mittels Multisinus

Ein Ablaufdiagramm des Verfahrens ist Abbildung 2 zu entnehmen. Das gemessene Signal wird zunächst mit einem geeigneten Rechteckfenster beschnitten. Im Anschluss wird das Signal mittels Fourier-Transformation in den Frequenzbereich transformiert und das Fremdgeräusch geschätzt. Mit dem geschätzten Fremdgeräuschpegel wird eine Pegelkorrektur an den Peaks nach (10) durchgeführt. Liegt der Peak-Pegel unterhalb des geschätzten Fremdgeräuschs, wird dieser aus den folgenden Betrachtungen ausgeschlossen. Zuletzt werden die Terzpegel anhand des FFT-Spektrums durch Aufsummieren der FFT-Bins gebildet. Damit korrekte Terzpegel berechnet werden, muss das Spektrum mit einem Korrekturfaktor c

$$c = p_0^{-1} \cdot 2^{-1/2} \cdot N^{-1} \cdot 2 \quad (11)$$

multipliziert werden. Enthalten ist der Bezug auf den Referenzschalldruck $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$, die Effektivwertbildung durch das Multiplizieren mit $2^{-1/2}$, das Dividieren durch die Anzahl an Samples N des Signals, um einen mittleren Wert über den Messzeitraum zu erhalten und das Verdoppeln der Amplitude, da in diesem Fall mit dem halbseitigen Spektrum bis $f_s/2$ gearbeitet wird.

Messtechnische Validierung

Die Validierung des Messverfahrens wurde im Maßstabsmodell durchgeführt. Eine Kiste aus MDF-Platten mit den Maßen $1,00 \text{ m} \times 0,45 \text{ m} \times 0,38 \text{ m}$ ($l \times b \times h$) diente dabei als Raummodell im Maßstab 1:10. Die längeren Wände des Raumes waren fest miteinander verklebt, wobei die Flächen an den Enden der langen Seiten herausnehmbar waren. Eine dieser Flächen war mit Metallklammern an einer Gummidichtung fest eingespannt, wobei

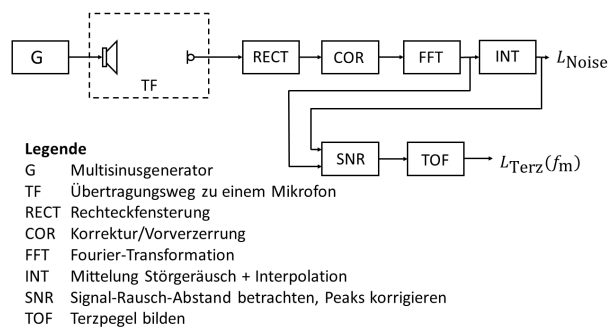


Abbildung 2: Ablaufdiagramm für die Ermittlung eines Terzpegelspektrums unter Verwendung eines Multisinus-signals.

die andere beweglich war und somit die Länge des Innenraums eingestellt werden konnte. Für alle Messungen wurde eine Innenraumlänge von $0,92 \text{ m}$ eingestellt.

Vergleich der Pegeldifferenzen: Rauschen, Sweep und Multisinus

Abbildung 3 zeigt die ermittelten Schalldruckpegeldifferenzen mit Sweep und Rauschen.

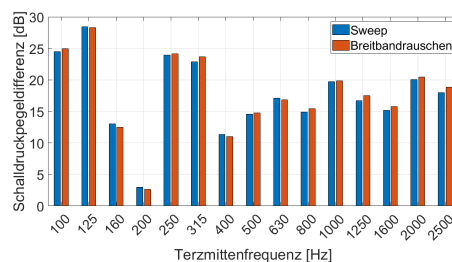


Abbildung 3: Mit Sweep und Rauschen ermittelte Schalldruckpegeldifferenz am Maßstabsmodell.

Die maximale Differenz zwischen beiden Messungen beträgt $0,8 \text{ dB}$. Für weitere Betrachtungen wird die Messung mit dem Rauschen als Referenz gewählt. Abbildung 4 zeigt die mit Multisinus ermittelte Schalldruckpegeldifferenz unter Verwendung verschiedener Frequenzauflösungen $\Delta f = [6, 25; 3, 125; 1, 56125; 0, 78125] \text{ Hz}$.

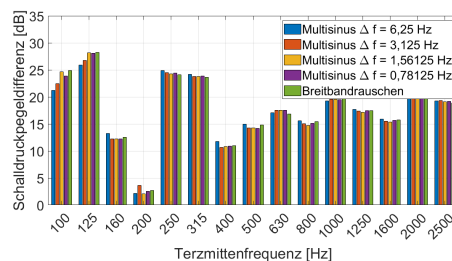


Abbildung 4: Mit Multisinus unter Verwendung verschiedener Frequenzauflösungen ermittelte Schalldruckpegeldifferenz am Maßstabsmodell.

Besonders große Abweichungen sind in den Terzbändern 100 Hz und 125 Hz zu sehen. In diesen Terzbändern sind für den größten Peakabstand $\Delta f = 6,25 \text{ Hz}$ nur 3 bzw. 5 Töne enthalten. Damit ist die Abtastung der tatsächlichen Dämmwirkung durch die Wand sehr grob

und insbesondere die die Schalldruckpegeldifferenz bestimmenden Minima und Maxima werden nicht mit erfasst.

Signal-Rausch-Abstand bei Messung mit Breitbandrauschen, Terzbandrauschen, Sweep und Multisinus

Um den erreichbaren Signal-Rausch-Abstand (SNR) mit den Messsignalen Breitbandrauschen, Terzbandrauschen, Sweep und Multisinus ($\Delta f = [6, 25; 0, 78125]$ Hz) zu bestimmen, wurde der Messaufbau leicht angepasst. In den Modellraum wurde ein weiterer Lautsprecher eingebracht, womit der SNR über die Darbietung eines weißen Rauschens im Inneren eingestellt werden konnte. Für die Messungen wurden alle Messsignale auf den gleichen mittleren Pegel eingestellt, sodass sie in etwa die gleiche elektrische Leistung hatten. Der Störgeräuschpegel wurde ausgehend vom Ruhepegel in 2 dB-Schritten insgesamt acht mal erhöht.

Der SNR wurde für die Terzbänder mit den Mittenfrequenzen 100 Hz, 315 Hz und 500 Hz betrachtet. Die mittleren SNR-Differenzen zwischen den Multisinussignalen und dem Terzbandrauschen sind Tabelle 1 zu entnehmen. Ein messbarer SNR-Gewinn bei der Verwendung des Multisinussignals ist erst ab der Terzmittenfrequenz 315 Hz erkennbar. Das Multisinussignal mit dem größeren Peakabstand erreicht dabei einen höheren SNR als das mit dem geringeren Peakabstand. Dies entspricht den Erwartungen, da bei dem größeren Peakabstand insgesamt weniger Peaks und somit weniger Frequenzanteile in dem Messsignal enthalten sind. Es wird also die gleiche Signalenergie auf weniger Frequenzen aufgeteilt und jede Signalfrequenz erhält damit auch einen größeren Teil der Gesamt-Signalenergie. Damit kann die Signalamplitude und auch der erreichbare SNR erhöht werden.

Tabelle 1: Mittlere SNR-Differenz zwischen dem Multisinus mit dem Peakabstand 0,78125 Hz ($\Delta\bar{L}_{0,78125}$) und dem Peakabstand 6,25 Hz ($\Delta\bar{L}_{6,25}$) zu dem Terzbandrauschen für die Terzbänder mit den Mittenfrequenzen 100 Hz, 315 Hz und 500 Hz.

Terzmittenfrequenz [Hz]	$\Delta\bar{L}_{0,78125}$ [dB]	$\Delta\bar{L}_{6,25}$ [dB]
100	-14,6	-9,5
315	18,9	27,8
500	6,0	15,0

Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Schalldruckpegeldifferenz über dem SNR für alle betrachteten Messsignale in der 315 Hz Terz. Es ist zu sehen, dass die höchsten SNR-Werte mit den beiden Multisinussignalen erreicht werden können, gefolgt von dem Terzbandrauschen, Breitbandrauschen und dem Sweep.

Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass mit Hilfe eines Multisinussignals die Messung der Schalldruckpegeldifferenz bei sehr tiefen Frequenzen möglich ist. Wird der Peak-Abstand verringert, kann insbesondere bei den Terzen mit den Mittenfrequenzen 100 Hz und 125 Hz (im Modell) eine Verbesserung der Ergebnisse erzielt werden.

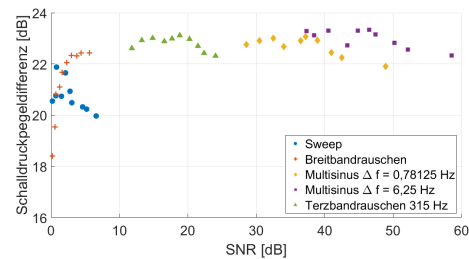


Abbildung 5: Ermittelte Pegeldifferenz mit Breitbandrauschen, Terzbandrauschen, Sweep und Multisinus ($\Delta f = [0, 78125; 6, 25]$ Hz) in der Terz mit der Mittenfrequenz 315 Hz über dem SNR.

Für Terzmittenfrequenzen ≥ 315 Hz kann mit dem Multisinussignal ein höherer SNR als mit den Messsignalen Terzbandrauschen, Breitbandrauschen und Sweep erreicht werden.

Literatur

- [1] C. Schulze, L. Eckert und J. Hübel. “Untersuchungen zur Schallimmissionsprognose bei tieffrequenten Geräuschen”. In: *Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie* 2021.Heft 9 (2021), S. 1–90. URL: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/37407>.
- [2] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO 16283-3, Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau - Teil 3: Fassadenschalldämmung*. 2016.
- [3] K. Picker und V. Wittstock. “Zum aktuellen Stand der Entwicklung primärer Schalleistungsquellen an der PTB”. In: *45. Deutsche Jahrestagung für Akustik (DAGA 2019)* (2019).
- [4] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO 18233, Akustik - Anwendung neuer Messverfahren in der Bau- und Raumakustik*. Berlin, 2006.
- [5] A. Novák u. a. “Nonlinear System Identification Using Exponential Swept-Sine Signal”. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 59.8 (2010), S. 2220–2229. ISSN: 0018-9456. DOI: 10.1109/TIM.2009.2031836.
- [6] G. Defrance, L. Daudet und J.-D. Polack. “Finding the onset of a room impulse response: straightforward?” In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 124.4 (2008), EL248–54. ISSN: 0001-4966. DOI: 10.1121/1.2960935.
- [7] E. Czerwinski u. a. “Multitone Testing of Sound System Components - Some Results and Conclusions, Part 1: History and Theory”. In: *Journal of the Audio Engineering Society* Vol. 49.No. 11 (2001).
- [8] M. Schroeder. “Synthesis of low-peak-factor signals and binary sequences with low autocorrelation (Corresp.)” In: *IEEE Transactions on Information Theory* 16.1 (1970), S. 85–89. ISSN: 0018-9448. DOI: 10.1109/TIT.1970.1054411.