

Interferenz von breitbandigen Geräuschen bei der akustischen Abnahme von Freifeldräumen

Xiaoru Zhou, Gerhard Babuke, Roman Wack und Ting Zhang

Fraunhofer-Institut für Bauphysik, 70569 Stuttgart, Deutschland, Email: zhou@ibp.fhg.de

Einleitung

Zur Eignungsfeststellung von Halb- oder Freifeldräumen wird messtechnisch geprüft, inwieweit die Schallpegel von den idealen Werten des Entfernungsgesetzes abweichen. Entsprechend der Anforderungen an den Raum werden dabei als Prüfsignale entweder Terzrauschen oder Einzeltöne verwendet. Die gemessenen Abweichungen vom Entfernungsgesetz sind jedoch Prüfsignalabhängig. Anhand von Beispielen wird ein Rechenmodell vorgestellt, mit dem die Überlagerung zweier breitbandiger Signale abgeschätzt werden kann. Daran lassen sich die Auswirkungen der Wahl des Prüfsignals auf die Abnahmemessungen erkennen.

Rechenmodell

Überlagert sich ein Sinuston mit seiner Reflektion von einer Grenzfläche, ergibt sich der Summenschalldruck:

$$p_{\text{sinus}} = \frac{A}{r_0} e^{-jk r_0} + R_{\text{refl}} \frac{A}{r_{\text{refl}}} e^{-jk r_{\text{refl}}} = p_0 (1 + R_{\text{refl}} x e^{-jk \Delta r}) \quad (1)$$

Hier ist A der von der Quellen-Stärke abhängige Faktor; R_{refl} ist der komplexe Reflektionsfaktor der Grenzfläche; r_0 und r_{refl} sind der Laufweg des Direktschalls und der Reflexion; $k = \omega/c_0$ ist die Wellenzahl; p_0 ist der Schalldruck des Direktschalls bei der Entfernung r_0 ; $\Delta r = r_{\text{refl}} - r_0$ ist der Laufwegunterschied; $x = r_0 / r_{\text{refl}}$ ist das Laufwegverhältnis. Demnach ist der Betrag des Schalldrucks mit der Kammfilterbreite $B_{\text{Kamm}} = c_0/\Delta r$, (c_0 = Schallgeschwindigkeit der Luft) und dem Laufwegverhältnis x eine eindeutige Funktion des Betrages des Reflektionsfaktors $|R_{\text{refl}}|$:

$$p_{\text{sinus}}^2 = p_0^2 \left[(1 + x^2 |R_{\text{refl}}|^2) + 2x |R_{\text{refl}}| \cos\left(\frac{2\pi f}{B_{\text{Kamm}}}\right) \right] \quad (2)$$

Die Größe B_{Kamm} bleibt konstant, wenn sich die Laufwegunterschied Δr nicht verändert. Sie ist die Frequenzdifferenz zwischen zwei möglichen Maxima (oder Minima). Der Summen-Schallpegel von zwei Sinustönen hat ein deutliches Maximum bzw. Minimum bei $\cos(2\pi f / B_{\text{Kamm}}) = \pm 1$. Wenn sich z.B. ein Swept-Sinus-Signal mit einem räumlich 7 m verzögerten, kohärenten, gleich starken Signal trifft, wird ein nacheinander entstehendes Überlagerungsmuster im Frequenzbereich mit einer Kammfilterbandbreite B_{Kamm} von ca. 49 Hz erwartet, siehe die dünne Kompaktlinie in Abb. 1.

Das Frequenzspektrum eines Geräusches besteht aus mehreren „Frequenzlinien“ im entsprechend Frequenzband. Wird das Geräusch von einer Grenzfläche reflektiert, überlagert sich die einzelne „Frequenzlinie“ im direkten

Geräusch mit der Frequenzlinie der gleichen Frequenz im reflektierten Geräusch nach der Gleichung (1).

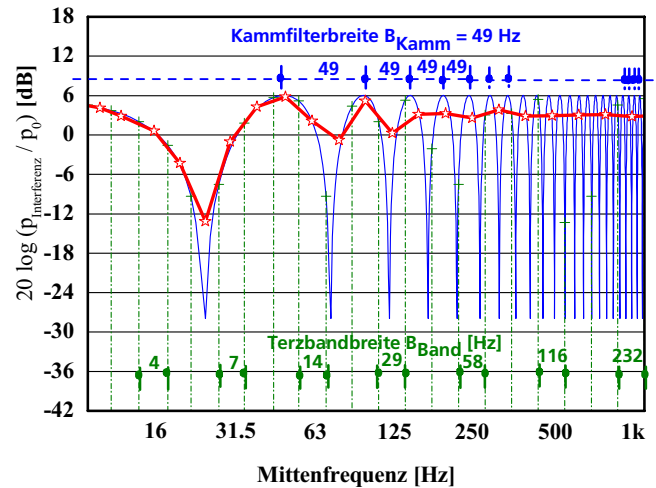


Abbildung 1: Überlagerungsmuster von Sinus- und Terzbandsignalen

Treffen sich beispielsweise zwei gleich starke Rauschsignale (Frequenzbreite von 8 Hz bis ca. 1122 Hz) mit einer Laufwegunterschied von z.B. ca. 7 m, wird sich im Frequenzbereich das gleiche Kammfiltermuster wie in Abb. 1 (dünne Kompaktkurve) bilden. Wird mit einem Linear-Frequenzfilter der überlagerte Schalldruck detailliert aufgenommen, kann im Frequenzbereich die gleiche Feinstruktur des Überlagerungsmusters (dünne Kompaktkurve in Abb. 1) aus zwei Rauschsignalen beobachten werden. Empfängt man diese Überlagerung statt mit einem Linear-Frequenzfilter mit einem Terzband-Filter, ist ein schwächeres Überlagerungsmuster (die „Linie mit Sternchen“, wobei die senkrechten „Strich-Punkt“-Linien die einzelnen Terzbänder trennen) zu erwarten.

Den mittleren Schalldruck des (Terzband) Geräusches erhält man durch die energetische Summierung des Schalldrucks aller einzelnen überlagerten Frequenzlinien:

$$p_{\text{Band}}^{-2} = \frac{1}{f_o - f_u} \int_{f_u}^{f_o} p_0^2 \left((1 + x^2 |R_{\text{refl}}|^2) + 2x |R_{\text{refl}}| \cos\left(\frac{2\pi f}{B_{\text{Kamm}}}\right) \right) df \quad (3)$$

Hier wird der mittlere Schalldruck im gewählten Frequenzband gebildet, damit der Schalldruck des Bandes mit dem Schalldruck des Sinus-Signals energetisch vergleichbar ist. Unter der Annahme, dass der Reflektionsfaktor $|R_{\text{refl}}|$ im Frequenzbereich $B_{\text{Band}} = f_o - f_u$ nicht frequenzabhängig ist, kann die Gleichung (3) analytisch integriert werden:

$$p_{\text{Band}}^{-2} = p_0^2 \left[(1 + x^2 |R_{\text{refl}}|^2) + 2x |R_{\text{refl}}| \frac{B_{\text{Kamm}}}{\pi B_{\text{Band}}} \sin\left(\frac{\pi B_{\text{Band}}}{B_{\text{Kamm}}}\right) \cos\left(\frac{2\pi f_{\text{BC}}}{B_{\text{Kamm}}}\right) \right] \quad (4.)$$

mit $B_{\text{Kamm}} = \frac{C_0}{\Delta f}$, $f_{\text{BC}} = \frac{f_0 + f_u}{2}$, und $B_{\text{Band}} = f_0 - f_u$

Hier ist B_{Kamm} wie in Gleichung (2) die Kammfilterbandbreite; B_{Band} ist die gewählte Bandbreite des Frequenzbandes und f_{BC} ist die Mittenfrequenz des Frequenzbandes; f_0 und f_u sind entsprechend die obere und untere Grenzfrequenz des gewählten Frequenzbandes. Die ersten Anteile $1 + x^2 |R_{\text{refl}}|^2$ sind in beiden Gleichungen (2) und (4), sie sind nur vom Laufwegverhältnis x und Reflektionsfaktor R_{refl} der Grenzfläche abhängig. Die zweiten Anteile in (2) und (4) stellen entsprechend die Überlagerungseffekte dar. Sie zeigen den Unterschied der Überlagerung beider Signale. Drei Sonderfälle werden hier diskutiert:

(1) $B_{\text{Band}}/B_{\text{Kamm}} \ll 1$ (gewählte Bandbreite im Testsignal ist viel kleiner als die Kammfilterbreite): In Abb. 1 ist z.B. im Frequenzbereich unterhalb 63 Hz ersichtlich, dass alle Terzbandbreiten kleiner als 14 Hz und somit auch kleiner als die Kammfilterbreite von 49 Hz sind. Unter dieser Voraussetzung ist $\sin\left(\frac{B_{\text{Band}}}{\pi B_{\text{Kamm}}}\right) \approx \frac{B_{\text{Band}}}{\pi B_{\text{Kamm}}}$ und $f_{\text{BC}} \approx f$.

Der zweite Anteil in Gleichung (4) nähert sich dem zweiten Anteil in der Gleichung (2) an. Die Überlagerung der Geräusche nähert sich der Sinuston-Überlagerung an. Der Summenschalldruck zweier Geräusche beim Maximum ist $p_{\text{Band}}^{-2} = 4p_0^2$ (bei der Annahme $x \approx 1$ und $R_{\text{refl}} \approx 1$), und führt zu einer 6 dB Pegelerhöhung wie bei bekannter Überlagerungen zweier kohärenter Sinustöne.

(2) $B_{\text{Band}}/B_{\text{Kamm}} \gg 1$ (gewählte Bandbreite im Testsignal ist viel größer als die Kammfilterbreite, in Praxis reicht $B_{\text{Band}} > B_{\text{Kamm}}$): Im Frequenzbereich größer als 250 Hz, z.B. in Abb. 1 sind alle Terzbandbreiten größer als 49 Hz, der zweite Anteil in Gleichung (4) verschwindet. Bei der Annahme $x \approx 1$ und $R_{\text{refl}} \approx 1$, ergibt sich der mittlere Schallpegel für zwei Geräusche: $p_{\text{Band}}^{-2} = 2p_0^2$. Wie erwartet führt zu einer 3 dB Pegelerhöhung wie bei nicht kohärenter Überlagerung der zwei Geräusche mit gleicher Schallenergie.

(3) $R_{\text{refl}} \approx 0$ oder $x \approx 0$: Es gibt kaum einen Unterschied zwischen der Überlagerung von Sinus- oder Geräuschen.

Einfluss in der Abnahmemessung

Nach EN ISO 3745 [1] wird die Eignung der Frei- oder Halbfreifeldräume mit Draw-Away-Messung geprüft. Das Prüfsignal wird je nach Anforderung vom Nutzer ein Sinussignal oder Terzrauschen sein. Liegen die gemessenen Abweichungen vom Entfernungsgesetz im erlaubten Toleranzbereich, wird der Raum als geeignet bezeichnet.

In der Praxis gibt es in einem Halb- oder Freifeldraum neben dem Direktschall nicht nur eine Reflexion, sondern mehrere erste Reflexionen und die Reflexionen der höheren Ordnungen. Der Reflexionsfaktor R_{refl} der Grenzflächen ist normalerweise sehr gering. Alle Reflexionen haben unterschiedliche Laufwegverhältnis x zum Direktschall (zwischen 0 und 1). Eine analytische Lösung wie die

Gleichung (4) ist deshalb nicht mehr möglich. Das Problem kann nur numerisch gelöst werden. Ein Rechenprogramm zur akustischen Auslegung von Freifeldräumen wurde entwickelt, um die Wirkung der akustischen Auskleidung abzuschätzen [2]. Im Rechenprogramm sind die Rechnungen der Überlagerung nicht nur mit üblichem Sinuston als Quellsignal, sondern auch mit den Terzsignalen nach dem Prinzip von Gleichung (4) möglich.

Abb. 2 zeigt ein Mess- und Rechenbeispiel. Die lichte Abmessung eines Halbfreiraums ist 7.55 x 4.45 x 5.68 m. Der Raum ist mit BKA (Breitbandkompakt-Absorber, Dicke ca. 25 cm) ausgekleidet. Bei der Draw-Away-Messung befindet sich die Schallquelle auf der Bodenmitte. Abb. 2 zeigt die Mess- (Kompakt-Linie) und Rechenergebnisse (Kreis) auf einer Diagonalbahn. Die entsprechenden Kurven nach dem Entfernungsgesetz (Mitte), oberer- und unterer Toleranzbereich sind durch Strich-Punkt-Linien dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die mit Terzsignalen untersuchten Räume (das rechte Diagramm in Abb. 2) eine geringere Abweichung von der Idealkurve des Entfernungsgesetzes aufweisen.

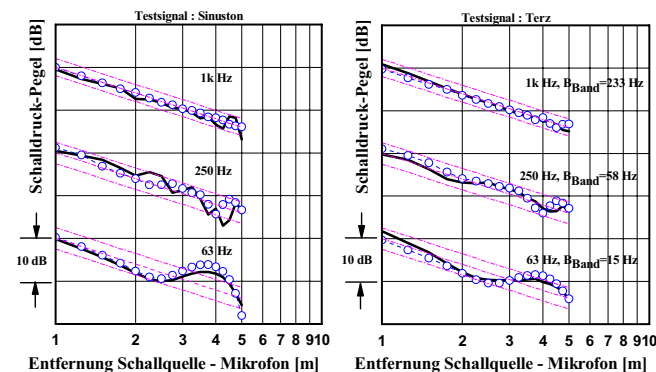


Abbildung 2: Mess- und Rechenergebnisse mit Sinus- und Terzsignalen. Die Toleranzen nach DIN 3745 bei Frequenzen 63, 250 und 1k Hz sind ± 2.5 , ± 2.5 und ± 2 dB

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein Rechenmodell für die Überlagerung zweier kohärenter Bandsignale vorgestellt. Die Überlagerung von Bandsignalen ist wegen der energetischen Mittlung im Frequenzband bei gleicher Frequenz schwächer als von Sinustönen. Je breiter das gewählte Frequenzband ist, desto weniger ausgeprägt ist die Amplitude der Überlagerung in diesem. Der Kostenaufwand für Freifeldräume, die für Sinussignale dimensioniert werden sollen, ist höher als solche, die nur für Geräusche ausgelegt sind. Dies sollte, wenn die Nutzung des Raums nur Geräusche vorhersieht, beachtet werden. [1]

Literatur

[1] ISO 3745-2003 Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Precision methods for anechoic and hemi-anechoic rooms
 [2] Xiaoru Zhou, Xueqin Zha und Gerhard Babuke: Computerised planning aid for the design of anechoic chambers, DAGA 2004.