

X. Zhou, X. Zha, G. Babuke

Zur Simulation von Freifeld-Räumen*

Einleitung

Die Qualität eines Freifeldraumes oder Halbfreifeldraumes (nur Boden reflektierend) hängt nicht nur von der Absorption der Raumauskleidung ab. Viele andere Parameter, z.B. die Raumgeometrien, die Position von Quelle und Empfänger sowie der Verlauf der Messbahn, spielen je nach konkreter Situation eine wichtige Rolle. Der praktische Eignungsnachweis eines Freifeldraumes ist durch eine Prüfung der Schalldruck-Pegelabnahme nach der Norm ISO 3745 [1] möglich. Die Eignung des Freifeldraumes stellt sich aber erst heraus, wenn er bereits fertig gebaut ist. Für die Planung neuer Freifeldräume ist es daher wichtig, bei der Planungsphase die relevanten Parameter zu optimieren. Um ihren Einfluss auf das Freifeld, das heißt die Raumrückwirkung auf das Direktfeld der Quelle, vorhersagen zu können, wurde ein Rechenprogramm entwickelt.

Das Rechenverfahren

Als Simulationsprogramm wurde ein Modell basierend auf Spiegelschallquellen verwendet. Befindet sich eine Kugelquelle der Stärke A_0 in einem Raum, kann der Schalldruck p im Abstand r_0 an einem Punkt unter bestimmten Bedingungen [2] in folgender Formel dargestellt werden:

$$p = \frac{A_0}{r_0} e^{-jk r_0} + \sum_{i=1}^N R_i \frac{A_0}{r_i} e^{-jk r_i} \quad (1)$$

k ist die Wellenzahl, i ist der Index über die Spiegelquellen, N die Anzahl der zu berücksichtigenden Spiegelquellen, r_i der Abstand von der einzelnen Spiegelquelle zur Messposition,

$$R_i = |R_i| e^{j\varphi_i} \quad (2)$$

der Reflexionsfaktor der entsprechenden Begrenzungsfläche, n schließlich die Ordnung der Spiegelquelle. Der erste Term in Gleichung (1) ist der Beitrag des Direktschalls. Der

Frequenz [Hz]	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50	3,75	4,00	4,25	4,50
20	-1,1	-1,0	-0,9	-0,7	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,5	0,7	0,8	1,0	1,1
25	-1,0	-1,0	-1,0	-0,9	-0,7	-0,6	-0,4	-0,2	0,1	0,3	0,5	0,6	0,8	0,9	1,0
31,5	-0,8	-1,0	-1,0	-1,0	-0,9	-0,8	-0,6	-0,3	-0,1	0,1	0,4	0,6	0,8	0,9	1,0
40	-0,6	-0,8	-1,0	-1,1	-1,1	-1,0	-0,9	-0,6	-0,3	0,0	0,2	0,5	0,8	1,0	1,1
50	-0,4	-0,6	-0,9	-1,1	-1,2	-1,3	-1,2	-1,0	-0,7	-0,3	0,1	0,4	0,8	1,0	1,3
63	-0,5	-0,5	-0,7	-1,0	-1,2	-1,4	-1,5	-1,4	-1,1	-0,6	-0,1	0,4	0,8	1,2	1,5
80	0,2	0,3	0,3	0,1	-0,2	-0,7	-1,1	-1,3	-1,2	-0,7	-0,1	0,7	1,3	1,9	2,4
100	0,8	1,1	1,4	1,6	1,5	1,1	0,3	-0,7	-1,6	-2,0	-1,6	-0,7	0,3	1,2	1,9
125	-0,1	-0,2	-0,1	0,5	1,1	1,6	1,6	1,1	0,3	-0,7	-1,5	-1,6	-0,9	0,1	0,9
160	0,9	0,9	0,3	-0,7	-1,1	-0,4	0,8	1,4	1,3	0,4	-1,0	-2,0	-1,5	0,0	1,5
200	-1,4	-1,4	-0,5	0,2	0,0	-1,0	-1,4	-0,3	1,0	1,4	0,8	-0,6	-2,1	-2,2	-0,9
250	0,4	1,1	0,7	-0,2	0,5	1,5	1,0	-0,8	-1,5	0,2	1,3	0,7	-1,5	-4,1	-3,1
315	0,5	0,5	-0,2	1,0	1,2	-0,6	-0,1	1,3	0,1	-2,6	-1,3	0,7	0,3	-2,6	-4,4
400	-0,6	-0,5	-1,4	0,4	-0,9	0,2	1,4	-0,7	0,8	1,9	-0,6	-1,2	1,4	0,8	-2,9
500	-0,3	1,0	-0,1	1,3	-0,8	0,8	-1,4	-0,4	-0,3	-2,2	1,4	-0,7	-0,3	2,7	1,1
630	0,3	0,1	1,8	0,7	0,6	0,9	-1,6	0,9	-2,2	1,8	-1,1	2,6	1,1	1,0	3,2
800	0,4	0,6	1,0	0,9	-0,1	-1,0	1,4	2,3	-0,2	2,1	0,1	-0,7	0,7	-1,8	1,5
1000	-0,3	0,4	0,8	0,4	-0,2	-0,2	-0,1	-0,7	-0,8	0,7	0,4	-3,1	-1,8	1,6	-2,0
1250	-0,5	0,9	0,8	-0,9	-1,1	0,9	2,0	1,8	1,1	0,9	1,6	1,7	-0,2	-0,9	1,4
1600	0,5	0,4	-1,0	1,0	-0,3	0,6	-1,4	0,9	2,0	-0,9	-3,1	-0,9	0,4	-0,5	-2,7
2000	-0,3	-0,5	0,4	-0,6	0,4	-1,1	-3,1	0,6	0,0	-2,9	0,6	0,5	-2,9	0,5	1,1
2500	0,9	0,8	0,5	1,0	1,0	-1,0	2,1	1,5	2,2	2,8	0,4	-0,8	2,2	0,8	-0,8
3150	0,2	1,1	-0,2	-1,0	0,0	-1,1	1,8	-0,1	0,2	0,0	2,1	-1,7	-2,2	-1,0	-2,2
4000	-0,9	-0,2	0,4	0,7	-0,7	-2,2	1,0	-1,0	-2,9	0,3	-2,2	-1,5	-0,5	0,2	0,4
5000	-0,4	0,2	0,3	0,1	-0,9	0,4	-0,3	0,7	0,1	0,9	-0,9	-0,1	-1,9	-1,7	-3,0
6300	-0,5	0,6	-1,1	0,4	1,1	-0,1	1,0	-0,8	0,4	-0,1	0,4	0,2	0,9	2,1	0,8
8000	-0,1	0,1	0,7	1,1	-1,2	1,2	0,9	-1,0	1,2	-0,2	0,3	3,0	0,5	-0,2	2,3
10000	-0,4	-0,8	-0,6	-1,5	-0,9	-1,3	-0,6	-0,7	-1,6	-1,1	0,2	0,4	0,7	-1,8	-1,0
12500	0,3	0,1	-0,5	0,4	-1,5	1,1	1,5	1,4	1,8	-0,6	2,1	2,1	0,7	2,8	-2,2
16000	-0,6	-0,9	-0,8	-0,9	0,4	-1,2	-1,4	-0,6	-2,8	1,4	0,3	1,8	0,2	1,4	-1,8
20000	0,1	-0,7	0,4	0,0	-1,0	0,9	-0,4	0,7	2,6	-0,4	-2,6	-1,3	1,3	-0,8	-1,0

Bild 1: Freifeld-Raum 6 x 6 x 6 m; Quelle in Raummitte (0, 0, 3 m); $\alpha = 99\%$.

zweite Term stellt den Einfluss des Raumes dar. Der Reflexionsfaktor R_i ist eine winkelabhängige komplexe Zahl, die den Energieverlust und die Phasenverschiebung φ_i jeder Reflexion darstellt. Da die Absorption der Wandauskleidung im Freifeld- oder Halbfreifeldraum sehr hoch ist, wurden in den Beispielrechnungen nur der Direktschall und die Anteile der Spiegelschallquellen erster Ordnung jeder Grenzfläche berücksichtigt.

Rechenergebnisse und Diskussion

Einfluss der Absorption der Wandauskleidung

Der Reflexionsfaktor R_i der Wandauskleidung ist ein wichtiger Parameter. In der alten Norm (ISO 3745 Version 1977) [1] wird für die Wandauskleidung ein im Kundt'schen Rohr gemessener Wert $\alpha_0 \geq 0,99$ postuliert. Beispielhaft zeigt Bild 1 eine Tabelle, in der die Ergebnisse auf einer diagonalen Bahn von der Bodenmitte zu einer oberen Ecke für einen Raum mit den Abmessungen von 6 x 6 x 6 m³ berechnet wurden. Die Absorption der Wandauskleidungen wurde mit 0,99 winkelunabhängig angenommen. Die dunkel bzw. rosa hinterlegten Zellen zeigen die Werte, die den Toleranzbereich der Genauigkeitsklasse 1 nach [1] überschreiten. Es ist deutlich zu

* Vortrag „Computerised planning aid for the design of anechoic chambers“, CFA / DAGA 04, Strasbourg, März 2004, Abstr. p. 58

Frequenz [Hz]	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50	3,75	4,00	4,25	4,50
20	-1,1	-1,0	-0,9	-0,7	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	1,1
25	-1,0	-1,0	-1,0	-0,9	-0,7	-0,6	-0,4	-0,2	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1,0
31,5	-0,9	-1,0	-1,0	-1,0	-0,9	-0,8	-0,6	-0,4	-0,1	0,1	0,3	0,6	0,7	0,9	1,0
40	-0,7	-0,9	-1,0	-1,0	-0,9	-0,8	-0,6	-0,4	0,0	0,2	0,4	0,6	0,7	0,9	1,1
50	-0,5	-0,7	-0,9	-1,1	-1,2	-1,2	-1,0	-0,7	-0,3	0,0	0,4	0,7	1,0	1,2	
63	-0,3	-0,4	-0,6	-0,8	-1,1	-1,3	-1,4	-1,3	-1,1	-0,7	-0,3	0,2	0,6	1,0	1,4
80	-0,1	0,0	-0,1	-0,2	-0,4	-0,8	-1,1	-1,4	-1,5	-1,2	-0,8	-0,2	0,4	1,0	1,5
100	-0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,2	-0,2	-0,6	-1,1	-1,4	-1,3	-0,9	0,0	0,7	1,4
125	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5	0,6	0,6	0,4	-0,1	-0,8	-1,3	-1,3	-0,8	0,3	1,3
160	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	1,1	1,1	0,8	0,1	-0,8	-1,1	-0,5	0,6
200	0,6	0,7	0,4	0,2	0,3	0,6	0,7	0,7	0,8	1,0	0,9	0,2	-0,7	-1,0	0,0
250	0,3	0,3	0,5	0,8	0,7	0,2	0,2	0,5	0,4	0,2	0,1	0,1	-0,8	-2,4	-2,5
315	0,9	1,1	0,9	1,2	1,1	1,1	0,9	0,1	0,0	0,3	0,0	-0,3	-0,1	-1,2	-2,7
400	0,0	0,3	-0,6	0,9	-0,2	0,0	0,4	0,1	0,1	-0,6	0,1	0,3	0,1	0,3	-0,9
500	-0,1	0,1	-0,6	0,7	-0,9	0,9	-0,4	-0,1	0,3	-0,2	-0,5	-0,1	0,6	0,3	0,4
630	0,2	0,8	0,7	1,1	0,5	0,4	-1,1	0,9	-1,6	1,4	0,4	1,0	1,0	1,8	1,2
800	-0,9	-0,9	0,0	0,1	-0,4	-0,1	-0,8	-0,1	-1,1	1,1	-1,4	-0,3	-0,7	-0,9	-0,4
1000	-0,6	-0,3	-0,1	0,0	0,2	0,0	-0,7	-0,4	-0,5	-0,7	0,5	-2,0	0,7	0,1	0,2
1250	-0,6	0,5	0,7	-0,7	-0,6	0,3	0,7	0,8	0,5	-0,2	0,3	0,0	-2,4	-0,5	-0,8
1600	0,6	0,2	-0,3	0,2	0,2	0,6	0,4	0,2	-0,2	0,9	0,2	0,5	-0,2	-2,8	-0,9
2000	0,4	0,8	0,2	0,4	0,3	-0,8	0,1	0,4	-0,6	-0,5	0,8	-2,6	0,0	-0,5	1,5
2500	0,7	0,3	0,4	0,2	0,5	-0,6	0,8	0,8	0,9	0,6	-0,9	0,4	1,8	0,6	1,5
3150	-0,2	0,7	-0,1	-0,3	-0,3	0,6	-0,1	0,0	0,2	-0,7	0,8	0,6	-0,8	1,8	-1,8
4000	-0,2	-0,4	-0,1	0,0	0,1	0,1	-0,5	-0,3	-0,2	-1,1	-0,8	1,1	0,1	-0,4	-2,1
5000	-0,8	-0,1	-0,6	-0,9	-0,8	-0,2	-0,7	-0,1	-0,3	-0,8	0,9	-1,9	0,2	-0,3	-2,7
6300	0,3	0,7	0,2	-0,1	0,6	0,3	1,5	-0,6	-1,5	-1,1	1,9	0,3	-0,1	0,1	2,2
8000	0,3	0,0	-0,6	0,1	0,8	-0,4	-0,8	-0,8	-0,2	0,5	0,7	-0,3	-0,2	0,3	-0,6
10000	0,0	-0,3	0,0	-0,3	-0,8	0,1	-0,1	-0,3	0,6	0,5	-0,2	-0,5	-0,2	-1,2	1,2
12500	-0,6	-0,2	-0,1	-0,2	-0,8	-0,4	-0,5	-0,4	0,7	0,1	0,4	0,9	0,0	-0,9	-0,9
16000	-0,5	-1,0	-0,4	-0,1	-0,7	0,4	0,3	-0,8	-0,7	-1,4	-0,1	1,4	-1,0	-1,9	-0,6
20000	0,1	0,3	0,0	0,1	0,2	1,2	-1,1	-1,0	0,7	-1,4	-0,1	1,4	-0,6	0,9	-1,3

Bild 2: Halbfreiefeld-Raum 7 x 6 x 5 m, Quelle zentral bei (0, 0, 2,5 m)
 $\alpha = 99 \%$

sehen, dass es bei Messungen mit Sinus-Tönen auf einer diagonalen Messbahn hin zu einer Raumecke ab $r_0 = 2,5$ m viele Überschreitungen der Toleranz von ± 1 dB (800 bis 5000 Hz) bzw. $\pm 1,5$ dB (≤ 630 Hz und ≥ 6300 Hz) gibt, obwohl $\alpha = 0,99$ beträgt.

Die Absorption der Raumausskleidung verringert sich, wenn der Einfallswinkel der zum Messpunkt reflektierten Welle von senkrecht zu streifend übergeht, wie eine Studie [4] an strukturierten Schallabsorbern [3] gezeigt hat. Würden Spiegelquellen höherer Ordnung berücksichtigt, fielen die Abweichungen von der Pegelabnahme im Freifeld noch gravierender aus [2]. Erst wenn man einen ganz unrealistisch hohen und winkelunabhängigen Absorptionsgrad von $\alpha = 0,999$ annähme, würden Spiegelquellen nullter Ordnung Freifeldbedingungen bis weit in die Raumecken hinein suggerieren.

Einfluss der Raum-Geometrie

Das erste Beispiel (Bild 1) zeigt einen würfelförmigen Raum. Die Quelle wurde in der Raummitte positioniert. Wegen dieser starken Symmetrie überlagern sich einige Reflexionen mit fast gleich langem Laufweg am Messpunkt. Im Verlauf der Pegelabnahme sind durch entsprechende Interferenzen stärkere Pegelminderungen oder -erhöhungen zu sehen. Dieses Phänomen kann abgeschwächt werden, indem durch eine unsymmetrische Geometrie des Raumes und/oder eine Versetzung der Quelle aus der Raummitte die ungünstigen Kohärenzen im Schallfeld beseitigt werden.

Bild 2 zeigt ein Rechenergebnis für einen Halbfreiefeldraum mit den Abmessungen von 7 m x 6 m x 5 m. Der Rechteck-Raum besitzt zwar ein ähnliches Volumen wie in Beispiel 1, zeigt aber, selbst bei einer zentralen Anordnung der Punktquelle, Freifeldbedingungen bis 3,5 m.

Einfluss der Quellen-Position

Befindet sich die Schallquelle exakt in Raummitte, so ergeben sich wegen der maximal möglichen Symmetrien besonders starke Interferenzen. Wird die Schallquelle dagegen nur wenig aus der Mitte versetzt, z. B. von der Position (0 m, 0 m, 3 m) zur Position (0,5 m, 0,3 m, 2,8 m), so reduzieren sich die Überschreitungen ebenfalls erheblich.

Einfluss des Bodens im Halbfreiefeld-Raum

Befindet sich die Quelle bei der Messung in einem Halbfreiefeldraum (Boden schallreflektierend) mit einem Absorptionsgrad $\alpha = 0,06$ nicht im, sondern auf dem Boden, so dass das akustische Zentrum der Quelle sich in einem Abstand vom Boden befindet, überlagern sich die starken Reflexionen vom Boden mit dem Direktschall. Die Qualität der Raumausskleidung und die damit erreichbare Freifeldsimulation werden deswegen in den meisten Halbfreiefeld-Räumen in der Praxis fast unvermeidlich geschmälert.

Einfluss der Quellengröße

In manchen Fällen wird ein Lautsprecherkomplex (z.B. ein Dodekaeder) als Schallquelle verwendet. Alle Strahler des Lautsprecherkomplexes werden in Phase geschaltet. Ist die Abmessung des Komplexes nicht klein genug, so gibt es Wegdifferenzen zwischen den einzelnen Strahlern. Dieser Einfluss wird praktisch zwar durch die Überlagerung aller Strahler (meistens mehr als 6) teilweise ausgeglichen, kann aber bei der Pegelabnahme-Messung die Abweichung unerwünscht vergrößern.

Zusammenfassung

Mit einem Simulationsverfahren lassen sich die Parameter untersuchen, welche die akustischen Eigenschaften der Freifeldräume beeinflussen können. Manche Probleme, die in der Praxis auftreten, können so frühzeitig diskutiert und behoben werden. In der Praxis werden normalerweise die Raumgeometrie und Quellenposition vom Nutzer vorgegeben. Die Schallquellen befinden sich z.B. regelmäßig in einem Abstand vom reflektierenden Boden. Die Schallquellen sind auch meistens keine Punktquellen. Außerdem gibt es oft zusätzliche reflektierende Einbauten im Raum. Wenn die o.g. Bedingungen nicht optimal sind, kann ein Raum trotz Ausskleidung mit einem Absorptionsgrad von 99 % die Anforderung nach [1] verfehlen. Werden jedoch die o.g. Parameter optimiert, so kann auch ein Raum mit einem Absorptionsgrad kleiner als 99 % die Freifeldbedingung des Raumes nach [1] erfüllen.

Literatur

- [1] ISO/DIS 3745 (2003) Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Precision methods for anechoic and hemi-anechoic rooms.
- [2] Zhou, X.; Zha, X.: Zur Simulation von Freifeld-Räumen. (Veröffentlichung in Vorbereitung).
- [3] Fuchs, H.V. et al.: The new Volkswagen Acoustics Centre in Wolfsburg. Part 2 : Anechoic Room Linings. ATZ Worldwide Volume 105 (2003), 4, p. 19-23.
- [4] Zhou, X.; Zha, X.; Fuchs, H.V.: Bestimmung des Absorptionsgrades bei schrägem Lichteinfall (zur Veröffentlichung in der Zeitschrift für Lärmbekämpfung vorgesehen).

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK IBP

Institutsleitung: Prof. Dr. Gerd Hauser
 Prof. Dr. Klaus Sedlbauer

D-70569 Stuttgart, Nobelstr. 12 (Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart), Tel. 07 11/9 70-00
 D-83626 Valley, Fraunhoferstr. 10 (Postfach 11 52, 83601 Holzkirchen), Tel. 0 80 24/6 43-0

Herstellung und Druck: Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Satz- und Druckzentrum
 Nachdruck nur mit schriftlicher Genehmigung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik