

Die schalltechnische Simulationsberechnung - Ersatz oder Ergänzung normativer Verfahren?

Wolfgang Probst

Datakustik GmbH, 82205 Gilching, E-Mail: Wolfgang.Probst@Datakustik.de

Einleitung

Aufgrund neuerer Entwicklungen bei der numerischen Simulation von Maschinen und anderer technischer Einrichtungen als Schallquellen und bei der Berechnung der Schallausbreitung in beliebig komplexen industriellen Arbeitsumgebungen werden viele in Normen und Richtlinien festgelegte Vorgehensweisen quasi "überholt". Beispiele sind die Korrektur von gemessenen Emissionswerten vom Umgebungseinfluss, die in den zutreffenden Normen der Reihe ISO 3740 im Wesentlichen auf diffusen Schallfeldern beruhen, die zur Prognose meist zu grobe Beschreibung der Emission durch die zwei Einzahlwerte Schalleistungspegel und Emissions-Schalldruckpegel entsprechend der Maschinenlärm-Informationsverordnung und nicht zuletzt die Beschreibung der Schallausbreitung durch das Verfahren nach VDI-3760 [1], welches quaderförmige Räume und spiegelnd reflektierende Begrenzungsflächen voraussetzt. Insbesondere für die Büro- und Verwaltungsgebäude mit kreativer Lay-Out-Gestaltung und typischem Flachraumcharakter kann erst neuerdings mit den jetzt verfügbaren Simulationstechniken die Schallausbreitung unter Einbeziehung von Beugung mit der erforderlichen Genauigkeit berechnet werden, um so die zu erwartenden Beurteilungspegel oder auch die nach VDI 2569 [2] festgelegten Kenngrößen zu prognostizieren.

Eine dieser Kenngrößen, die in ihrer Leistungsfähigkeit bei der Beschreibung der schalltechnischen Qualität von Arbeitsstätten und anderen Aufenthaltsräumen bisher oft unterschätzt wird, ist der Speech Transmission Index STI nach [3]. Er erlaubt es, die Verständlichkeit von Sprachinformation zu beurteilen und ist mit Simulationstechniken für beliebig komplexe Raumgeometrien und -ausstattungen schon in der Planungsphase berechenbar. Die Kenngröße des STI selbst und ihre Abhängigkeit von den über Messung oder Simulation bestimmbar Parametern ist genormt - wenige Normen und Richtlinien beinhalten aber seine konkrete Anwendung im Planungsfall.

Ein Problem bei der Einbindung von Simulationsverfahren mit Schallteilchen oder Schallstrahlen in Normen und Richtlinien besteht darin, dass diese Verfahren - im Unterschied zum Spiegelquellenverfahren nach VDI 3760 - selbst nicht genormt sind. In Anbetracht der unterschiedlichen bereits am Markt angebotenen Softwareprodukte wäre es ein gangbarer Weg, nicht die Verfahren mit allen anzuwendenden Algorithmen selbst zu normen, sondern sich auf eine Norm oder Richtlinie zur Qualitätssicherung zu beschränken. Ein erster Schritt wäre dabei die Durchführung von Berechnungen mit Szenarien, deren Ergebnisse auch auf andere Weise als über Simulationsrechnung ermittelt werden können. Beispiele hierfür werden im Folgenden dargestellt.

Testaufgaben mit bekanntem Ergebnis

Berechnung für das Freifeld

Bei der Simulationsrechnung - beschrieben z. B. in [4] - treten im Hinblick auf die Genauigkeit des Ergebnisses völlig andere Probleme als bei den für die Schallausbreitung im Freien verwendeten deterministischen Berechnungsverfahren - z.B. nach ISO 9613-2 [5] - auf. Dies zeigt sich schon bei der als trivial erscheinenden Berechnung des Schallpegels in unterschiedlichen Abständen von der Schallquelle für ein Freifeld. Für die Simulation mit einem Programm, das die Festlegung von Raumbegrenzungsflächen verlangt, wird jeder dieser Flächen in jedem Frequenzband ein Absorptionsgrad von 1 zugewiesen. Der zu erwartende Schalldruckpegel L ergibt sich bekanntlich mit dem Schalleistungspegel L_w und der Luftdämpfung D_L nach ISO 9613-1 [6] im Abstand r von der Quelle zu

$$L = L_w - D_L - 10 \cdot \log(4 \cdot \pi \cdot r^2) \quad (1)$$

Mit einem festgelegten Schalleistungspegel - z.B. 93 dB (lin) in allen Frequenzbändern - werden an 15 Empfangspunkten in den Abständen 1m bis 20m in einer Staffelung gemäß VDI 3760 die Schalldruckpegel berechnet. Die Abweichung des mit Simulation von dem nach (1) berechneten Ergebnis sollte einen vorgegebenen Wert - z.B. $\pm 0,1$ dB - nicht überschreiten.

Diese einfache Aufgabe zeigt, ob das Programm über eine Möglichkeit verfügt, die Zahl der ausgesendeten Teilchen und deren Laufzeit je nach gewünschter Genauigkeit automatisch anzupassen.

In gleicher Weise wird eine Testaufgabe mit Empfangspunkten auf einer Kugeloberfläche zur Prüfung der Richtungsunabhängigkeit und mit Empfangspunkten über einer ideal reflektierenden Bodenplatte festgelegt.

Pegel und Nachhallzeit in einem Diffusfeld

Ein weiterer Satz von Testaufgaben bezieht sich auf ein diffuses Schallfeld, wobei das Modell eines idealen würfelförmigen Hallraums mit der Kantenlänge 6 m und einem Streugrad von 1 für alle Begrenzungsflächen [7] einer Simulationsrechnung zugrunde gelegt wird. Die Oberfläche S beträgt 216 m². Der Schallpegel im Diffusfeld L_{diff} kann aus (2) berechnet werden:

$$L_{diff} = L_w - 10 \cdot \log[4mV - S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})] + 6 \text{ dB} \quad (2)$$

Der Schalleistungspegel L_w , die Dämpfungskonstante der Luft m nach ISO 9613-1 und der mittlere Absorptionsgrad $\bar{\alpha}$ entsprechend Tabelle 1 führt mit (2) auf die in der letzten Zeile in Tabelle 1 genannten Pegelwerte. Der über Simula-

tionsrechnung ermittelte Pegelwert sollte sich nicht mehr als eine festzulegende Maximalabweichung - z.B. $\pm 0,5$ dB - von diesem Idealwert unterscheiden.

Tabelle 1: Berechnung der Pegel im diffusen Schallfeld

Größe	Frequenz (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
L_w dB	100	100	100	100	100	100
α	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
$m (20^\circ 60\%)*10^3$	0.09	0.28	0.64	1.11	2.13	5.86
L_{diff} nach (2) dB	95.5	95.5	95.3	95.2	94.9	93.9

Mit einer weiteren Testaufgabe kann die korrekte Ermittlung der Nachhallzeit T mit der Simulationsrechnung geprüft werden. Mit den o.g. Größen und dem Volumen V des Hallraums ergibt sie sich nach Eyring zu

$$T = \frac{0,163 \cdot V}{4 \cdot m \cdot V - S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (s) \quad (3)$$

In Tabelle 2 ist die Berechnung mit den aktuellen Parameterwerten ausgeführt und die zu erwartenden und in der letzten Tabellenzeile genannten Nachhallzeiten bilden wieder die Sollvorgabe für die mit Simulation ermittelten Nachhallzeiten.

Tabelle 2: Berechnung der Nachhallzeiten für den Modell-Hallraum

Größe	Frequenz (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
α	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
$m (20^\circ 60\%)*10^3$	0.09	0.28	0.64	1.11	2.13	5.86
T in s nach (3)	3.16	3.11	3.03	2.92	2.73	2.18

Bestimmung der Absorption einer Prüffläche im idealen Hallraum

Auch die Bestimmung des Absorptionsgrads einer Prüffläche in einem idealen Hallraum eignet sich als Test für die Validierung eines Verfahrens zur Berechnung von Schall in Räumen, wie in [7] gezeigt worden ist.

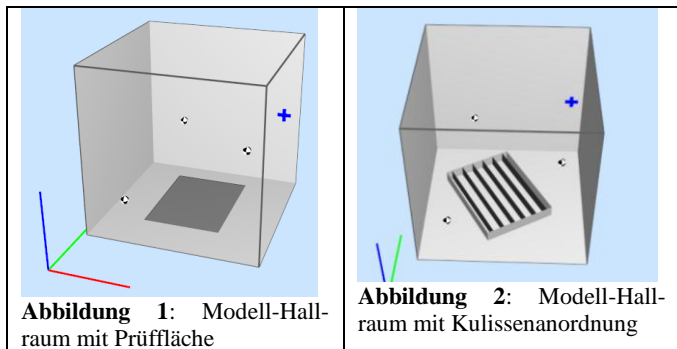


Abbildung 1: Modell-Hallraum mit Prüffläche

Abbildung 2: Modell-Hallraum mit Kulissenanordnung

Im berechneten Modell werden die Nachhallzeiten T_{vor} und T_{nach} vor und nach Einbringung der Prüffläche, der ein Absorptionsgrad von 0,5 in allen Frequenzbändern zugewiesen ist, durch Simulation bestimmt. Aus diesen Werten wird unter Anwendung der Gleichung (4) entsprechend

DIN EN ISO 354 [8] der Absorptionsgrad berechnet. Die Abweichung zwischen den mit Simulation berechneten Absorptionsgrad vom zugewiesenen Wert 0,5 sollte wiederum einen festzulegenden Wert - z.B. $\pm 10\%$ - nicht überschreiten.

$$\alpha = 0,163 \cdot \frac{V}{S} \cdot \left(\frac{1}{T_{nach}} - \frac{1}{T_{vor}} \right) \quad (4)$$

Die Kulissenanordnung gemäß Abbildung 2 besteht aus einer Reihenanzahl von vertikalen Streifen der Höhe 0,5 m mit Reihenmittenabstand von 0,5 m und mit einem Absorptionsgrad von 1 - gemäß [9] ergibt sich für diese Anordnung - bezogen auf die vom reflektierenden Rahmen umschlossene Prüffläche - ein theoretisch herleitbarer Absorptionsgrad von 0,83.

Schallausbreitung im Raum mit Streukörpern

Die Berechnung der Schallausbreitung für einen Raum mit Streukörpern und nicht diffusem Schallfeld kann mit einem in Anhang B der Richtlinie VDI 3760 beschriebenen Beispiel validiert werden. Die angegebene Streukörperdichte wird in einem Modell durch eine dichte Anordnung von Quadern gemäß Abbildung 3 realisiert. Den Quaderoberflächen wird ein Streugrad von 1 zugewiesen, um eine - nicht gewünschte - Auswirkung der regelmäßigen Anordnung auf die Ausbreitung zu verhindern.

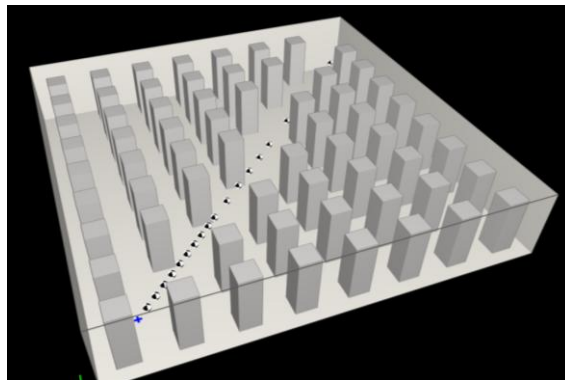


Abbildung 3: Modell des Raumes mit Streukörpern

Die genaue Festlegung der Randbedingungen würde den Rahmen dieses Beitrags sprengen - hier soll nur das Ergebnis einer mit Simulation berechneten Schallausbreitungskurve im Vergleich zu der in VDI 3760 angegebenen Kurve dargestellt werden.

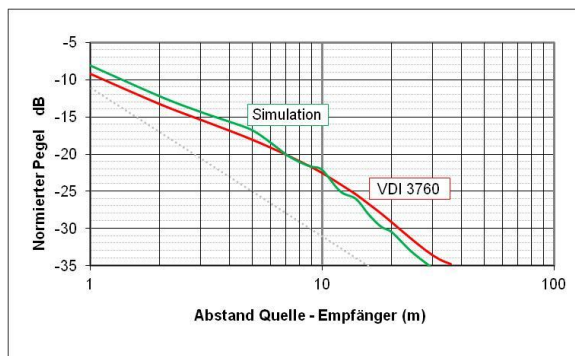


Abbildung 4: Vergleich Simulation - Sollkurve

Auch dieses Modell eignet sich gut zur Qualitätssicherung von entsprechender Software, wobei die Angaben zu den Ausgangsparametern selbstverständlich vervollständigt werden müssen.

Schallübertragung zwischen gekoppelten Räumen

Bei diesem Testbeispiel sind zwei identische Hallräume mit den o.g. Abmessungen und Eigenschaften über eine quadratische Öffnung festgelegter Größe akustisch gekoppelt.

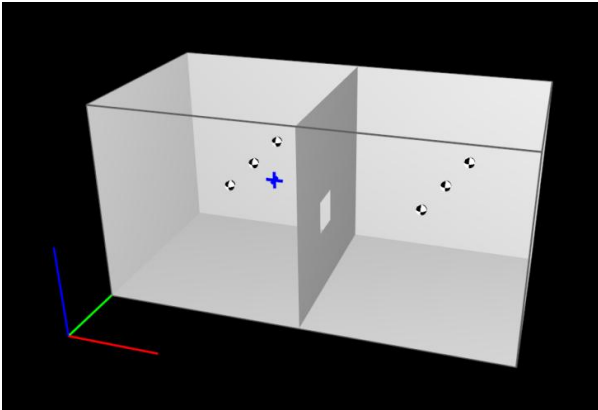


Abbildung 5: Über eine Öffnung gekoppelte Hallräume

Im linken Raum der Abbildung 5 befindet sich die Schallquelle, in beiden Räumen sind je 3 Empfänger diagonal verteilt angeordnet. Nach der Theorie gekoppelter Räume [10] sollte sich durch eine Öffnung mit Fläche S_{12} und der auf den Empfangsraum 2 bezogenen äquivalenten Absorptionsfläche A_{20} (ohne Kopplungsfläche) folgende Pegeldifferenz für beide Räume ergeben

$$L_1 - L_2 = 10 \cdot \log \left(\frac{S_{12} + A_{20}}{S_{12}} \right) \text{ dB} \tag{5}$$

Durch die Öffnung sollte sich der Pegel im Raum 1 um den Wert

$$\Delta L = 10 \cdot \log \left(\frac{A_{10} + S_{12} - \frac{S_{12}^2}{A_{20} + S_{12}}}{A} \right) \text{ dB} \tag{6}$$

vermindern, wobei A die Absorptionsfläche im Senderaum bei geschlossener Öffnung ist. Die mit (5) und (6) berechneten und die aus der Simulation sich ergebenden Werte sollten sich um weniger als eine festzulegende Maximalabweichung unterscheiden.

Schallbeugung im Freifeld

Wird der direkte Schallstrahl Quelle - Empfänger durch Objekte wie Schirme, Teiltrennwände oder Schränke blockiert, so bildet sich ein "akustischer Schattenbereich", in den der von der Quelle emittierte Schall nur durch Beugung über die Kanten oder durch Reflexion an anderen Objekten oder Raumbegrenzungsflächen gelangen kann.

Die Berechnung des gebeugten Schalls ist dann als korrekt zu betrachten, wenn die hinter einem Schirm berechneten

Pegel mit jenen übereinstimmen, die in einem entsprechenden Experiment auch messtechnisch festgestellt werden können. Diese "messtechnische" Vorerfahrung entspricht dem in seinen Grundzügen von Maekawa [11] entwickelten Formalismus, der auch der Beschreibung in der ISO 9613-2 zugrundeliegt. Danach wird der von einer Schallquelle S an einem Immissionsort R bei Ausbreitung im Freifeld verursachte Schalldruckpegel durch Einfügung eines breiten Schirms mit einer für die Beugung bestimmenden Kante um ein frequenzabhängiges Abschirmmaß D_z vermindert. Ist die Länge des Umwegs über die Schirmkante um den Umweg z größer als die Länge des direkten Wegs - ohne Schirm - zwischen Quelle S und Immissionsort R , so ergibt sich ein Abschirmmaß D_z von

$$D_z = 10 \cdot \log \left(3 + 40 \cdot \frac{z}{\lambda} \right) \text{ dB} \tag{7}$$

wobei z die Wegverlängerung durch den Umweg über die beugende Kante und λ die Wellenlänge ist. Unabhängig von der angewendeten Berechnungsstrategie sollten die mit (7) berechneten mit den über Simulation ermittelten Pegelminderungen in etwa übereinstimmen.

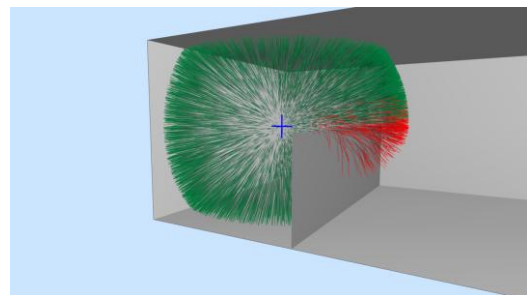


Abbildung 6: Abgewinkelte Teilchenbahnen über der Kante

In einem Raummodell entsprechend Abbildung 6 mit vollabsorbierenden Wänden und Decke werden die Empfangspunkte auf der rechten Seite des Schirms angeordnet. Die Ergebnisse werden in einem Diagramm gemäß Abbildung 7 zusammen mit einer aus Gleichung (7) berechneten Kurve eingetragen.

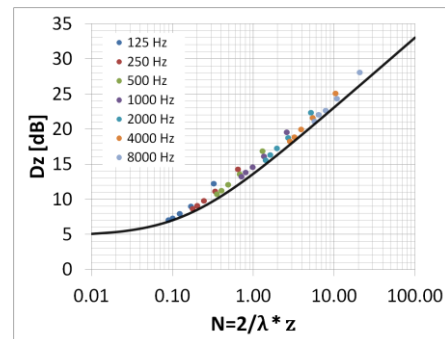


Abbildung 7: Vergleich von mit Simulation ermittelten D_z -Werten (Punkte) mit den Sollwerten (Kurve)

Diese Testaufgabe kann durch Variation der Absorptionsgrade von Wänden und Decke auch auf Räume mit nicht vernachlässigbarem Reflexionsschall erweitert werden.

Berechnung des Speech Transmission Index STI

Der STI nach [3] ist eine für die akustische Planung und Optimierung wichtige Kenngröße. Seine "Konstruktion" und Anwendung ist in [12] beschrieben.

Bei der Simulation kann für je eine Quell- und eine Empfängerposition der STI berechnet werden, wobei im ersten Schritt aus der energiebezogenen Impulsantwort die 98 Modulations-Transfer-Indizes m (7 Oktavbänder 125 Hz bis 8000 Hz und 14 Modulationsfrequenzen von 0,63 Hz bis 12,5 Hz) und aus diesen der letztlich die Sprachübertragung bestimmende STI-Wert zwischen 0 und 1 berechnet wird.

Im diffusen Schallfeld - und nur in diesem - können die genannten Indizes m in analytisch geschlossener Form aus den Nachhallzeiten berechnet werden.

$$m(f_m) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi f_m T}{13,8}\right)^2}} \quad (8)$$

Dabei ist f_m die Modulationsfrequenz, T die Nachhallzeit in Sekunden und $m(f_m)$ der Wert m bei der Modulationsfrequenz f_m und bei der Oktavband-Mittenfrequenz, bei der die Nachhallzeit T bestimmt worden ist.

Damit kann der auf die Berechnung des STI aus den mit Simulation ermittelten Echogrammen validiert werden, wenn ein diffuses Schallfeld verwendet wird.

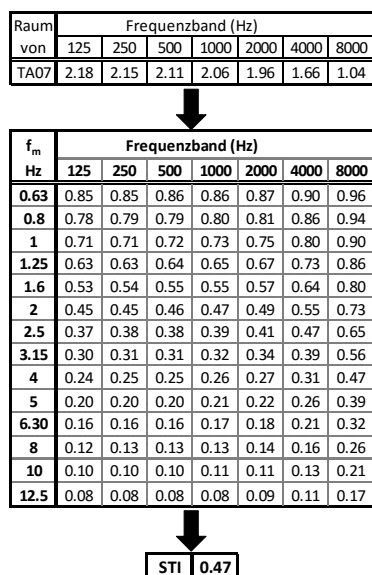


Abbildung 8: Berechnung des STI aus den Nachhallzeiten nach (8) für den Hallraum mit Prüffläche

Die Bestimmung des STI zwischen der Quellposition und einem der Immissionspunkte für den in Abbildung 1 dargestellten Hallraum mit Prüffläche unter ausschließlicher Verwendung der Nachhallzeiten ergibt gemäß Abbildung 8 einen Wert von 0,47. Der mit einem Simulationsprogramm direkt bestimmte Wert sollte sich um weniger als eine noch festzulegende Maximalabweichung davon unterscheiden.

Fazit

Diese dargestellten Beispiele sind nur eine kleine Auswahl zur Darstellung des Prinzips einer möglichen Validierung von Programmen zur Berechnung von Schall in Räumen. Es ist aber nach unserer Auffassung eine zielgerichtete Vorgehensweise, um ohne eine die Entwicklung einschränkende Vorgabe von Programmstrategien und Software-techniken auch die Verfahren zur Berechnung von Schall in Räumen durch Qualitätssicherung in das Gebäude der Normung einzubinden.

Literatur

- [1] VDI 3760 "Berechnung und Messung der Schallausbreitung in Arbeitsräumen", VDI-Handbuch, 1995
- [2] VDI 2569 E:2016 "Schallschutz und akustische Gestaltung im Büro", VDI-Handbuch Lärminderung
- [3] IEC 60268-16:2011 "Sound system equipment - Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index"
- [4] "SERT - Die Berechnung des Schalls in Arbeitsräumen", siehe www.datakustik.de
- [5] ISO 9613-2: 1996 "Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2: General method of calculation"
- [6] ISO 9613-1:1993 "Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere"
- [7] Probst W.: Die Bestimmung des Absorptionsgrads im "virtuellen" Hallraum. Lärmbekämpfung Bd. 10 (2015), Nr. 5
- [8] DIN EN ISO 354: Akustik - Messung der Schallabsorption in Hallräumen. Berlin: Beuth Verlag 2003
- [9] Probst W.: Die Schallabsorption von Kulissendecken. Lärmbekämpfung Bd. 3 (2008), Nr. 2
- [10] L. Cremer, H.A. Müller "Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik", Hirzel Verlag, 1978, Kapitel 3
- [11] Z. Maekawa: Noise Reduction by Screens, Applied Acoustics, 1, pp. 157-173
- [12] Probst W., Böhm M.: Die Ermittlung des STI (Speech Transmission Index) zur Beurteilung von Sprachgeräuschen. Demnächst veröffentlicht in Lärmbekämpfung Nr. 2, 2017