

Messung, Modellierung und Einsatz der Schallstreuung in der raumakustischen Planungspraxis

Eckard Mommertz

Müller-BBM, Schalltechnisches Beratungsbüro, Planegg

1. Einleitung

Die Bedeutung der diffusen Schallreflexion an strukturierten Oberflächen für die raumakustischen Gegebenheiten ist schon lange bekannt. Und dennoch ist die Thematik aktueller denn je. So sind seit geraumer Zeit Diffusoren kommerziell erhältlich, deren Streueigenschaften charakterisiert werden müssen. Des Weiteren ist in den zunehmends zum Einsatz kommenden raumakustischen Simulationsprogrammen auch die geeignete Modellierung der Schallstreuung erforderlich, um realistische Ergebnisse liefern zu können. Vor diesem Hintergrund wird in diesem Beitrag über den Einsatz, die Modellierung und insbesondere die Ermittlung der Streueigenschaften von architektonischen Oberflächen berichtet.

2. Anwendungsbeispiele

Im Rahmen der akustischen Auslegung von Räumen ist es häufig wünschenswert oder gar erforderlich, diffus reflektierende Raumbegrenzungsflächen in das gestalterische Konzept zu integrieren, z.B. um

- die Diffusität des Schallfeldes zu erhöhen
- frühe Reflexionen aus seitlichen Richtungen zu fördern
- den Kontakt der Musiker zu verbessern.
- eine ungünstige primäre Raumform aufzulösen
- störende langverzögerte Einzelreflexionen zu vermeiden

Im Gegensatz zu großen, ebenen und homogenen Oberflächen wird bei der Schallreflexion an diffus reflektierenden Oberflächen die reflektierte Schallenergie in unterschiedliche Richtungen gestreut. Bestens bekannt für eine gleichmäßige räumliche Verteilung der gestreuten Schallenergie sind die sogenannten Schroeder-Diffusoren [1]. Jedoch kommt der Einsatz dieser Strukturen schon alleine aus gestalterischen

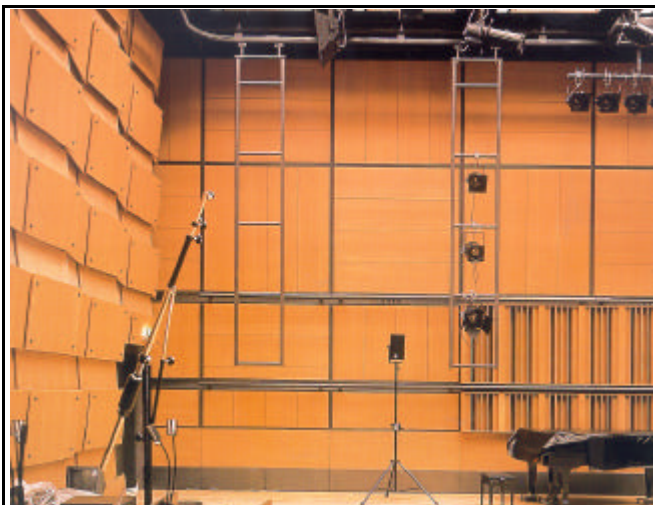


Abb. 1. Diffus reflektierende Wandverkleidungen im „Kubus“ des Zentrum für Kunst und Medien, Karlsruhe, 1997

Gründen aber auch aufgrund der auftretenden erhöhten Schallabsorption [2][3] nicht bei allen Anwendungen in Frage. Zumeist ist es aber auch gar nicht notwendig bzw. auch nicht zweckmäßig, die gesamte reflektierte Schallenergie gleichmäßig in alle Raumrichtungen zu verteilen. Vielmehr ist es von Bedeutung, einen Teil der Schallenergie aus der durch die primäre Raumform bedingten geometrischen Reflexionsrichtung zu lenken. Dies wird z.B. in alten Konzertsälen von Kassettendecken oder stilrichtungsbedingten Verzierungen, Pfeilervorlagen, Putten o.ä. erfüllt.

Ein modernes Beispiel einer Rückwandverkleidung zur Vermeidung von langverzögerten Reflexionen zeigt das Foto in Abb. 1. Strenggenommen sind von der auf der linken Bildseite zu sehenden Struktur diffuse Reflexionen lediglich bei mittleren Frequenzen zu erwarten, bei denen die Wellenlänge in der Größenordnung der Struktur liegt. Für hohe Frequenzen hingegen

reflektieren die einzelnen ebenen Platten den Schall geometrisch. Da jedoch der reflektierte Schall durch die unterschiedliche Ausrichtung der Elemente bezogen auf die Rückwandebene diffus aufgefächert



Abb. 2. Rückwandverkleidung zur Vermeidung von Brennpunkten; Renovierung Teatro Regio, Turin, 1997

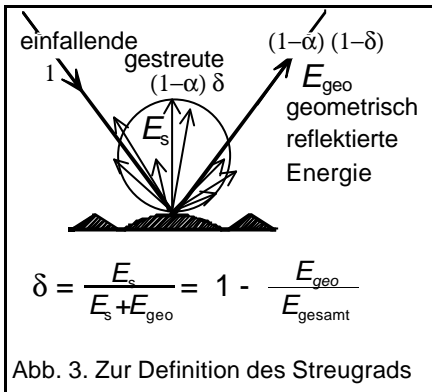
wird, kann auch hier im weiteren Sinne von einer diffus reflektierenden Wandverkleidung gesprochen werden. Das Gleiche gilt z.B. für konvex gekrümmte Elemente, mit denen Fokussierungen von konkav gekrümmten Wänden vermieden werden können und gleichzeitig formale gestalterische Aspekte berücksichtigt werden (Abb. 2).

2. Modellierung in der Simulation

Es stellt sich die Frage, wie die doch sehr unterschiedlichen Streueigenschaften bei der raumakustischen Planung Berücksichtigung finden. Hier ist auch heute noch ein Vorteil der raumakustischen Modellmeßtechnik zu sehen. Schallstreuende Strukturen können sehr gut maßstäblich verkleinert nachgebildet werden (z.B.[4]), und so kann in Raummodellen unmittelbar die Auswirkung auf die Schallübertragung durch Auswertung gemessener Raumpulsantworten beurteilt werden.

Im Gegensatz dazu erfordern die zunehmends zum Einsatz kommenden raumakustischen Simulationsverfahren eine geeignete Modellierung der Schallstreuung. Die heutigen Verfahren beruhen zumeist auf einer Kombination von Ray-Tracing- (bzw. Derivaten wie Cone- oder Pyramid-Tracing) und Spiegelquellen-Verfahren (z.B. [5-9]). In diesen wird die

Absorption der einzelnen Raumbegrenzungsflächen in der Regel über den Absorptionsgrad für allseitigen Schalleinfall (gemessen im Hallraum nach DIN EN 20 354 an 12 m² großen Materialmustern) oder einer daraus abgeleiteten schalldruckproportionalen Größe berücksichtigt. Den Streueigenschaften wird Rechnung getragen, indem den einzelnen



Oberflächen ein frequenzabhängiger Streugrad zugewiesen wird. Dieser entspricht dem Verhältnis von nicht geometrisch reflektierter zu insgesamt reflektierter Energie. Die Größe gibt folglich an, welcher Energieanteil der geometrischen Reflexion (z.B. beschrieben durch eine Spiegelquelle) verloren geht und in andere Raumrichtungen gestreut wird. Über die Richtungsverteilung der gestreuten Energie wird keine Aussage gemacht. Entsprechend ist die Umsetzung sowie die algorithmische Implementierung in den unterschiedlichen Simulationsprogrammen verschieden [10]. Häufig wird die Richtungsverteilung der gestreuten Energie vereinfachend über die aus der Optik bekannte Lambertsche Streueigenschaft angenähert. Im Gegensatz zu den Absorptionsgraden sind Streugrade nur bedingt in der Literatur zu finden und müssen bisher zumeist qualitativ abgeschätzt werden (z.B. [11]).

Wie genau die Schallstreuung von strukturierten Oberflächen aber auch Kanten letztlich berücksichtigt werden muß, ist noch nicht ausreichend geklärt. In diesem Zusammenhang darf jedoch nicht unerwähnt bleiben, daß das Ziel der raumakustischen Simulation in der Regel keine exakte Vorhersage der physikalischen Schallübertragung ist. Vielmehr sollen die interessierenden objektiven und subjektiven Schallfeldattribute hinreichend genau abbildet werden. Aus Sicht des raumakustischen Planers sind insbesondere die folgenden Aspekte zu nennen:

Wie genau die Schallstreuung von strukturierten Oberflächen aber auch Kanten letztlich berücksichtigt werden muß, ist noch nicht ausreichend geklärt. In diesem Zusammenhang darf jedoch nicht unerwähnt bleiben, daß das Ziel der raumakustischen Simulation in der Regel keine exakte Vorhersage der physikalischen Schallübertragung ist. Vielmehr sollen die interessierenden objektiven und subjektiven Schallfeldattribute hinreichend genau abbildet werden. Aus Sicht des raumakustischen Planers sind insbesondere die folgenden Aspekte zu nennen:

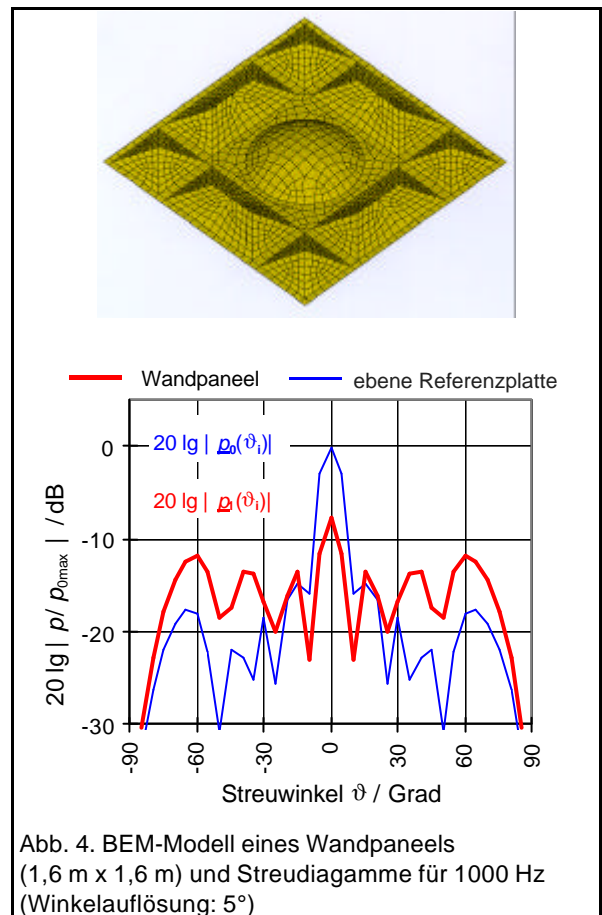
- Diffusität des Schallfeldes, insbesondere die Abweichungen der Nachhallzeit und des stationären Pegels (Stärkemaß) von der statistischen Nachhalltheorie
- Genauigkeit der übrigen raumakustischen Energiekriterien, wie Klarheitsmaß, Deutlichkeit oder Echokriterien
- für die Auralisation: realistischer Klangeindruck, einschließlich möglicher Artefakte wie z.B. Flatterechos

Daraus erwachsen auch Anforderungen an die Modellierung der Raumbegrenzungsflächen hinsichtlich Streuung und Absorption. Das Problem besteht dabei weniger in der algorithmischen Umsetzung als vielmehr in der mangelnden Kenntnis der genaueren Eingabegrößen (siehe auch [12]).

3. Bestimmung der Streueigenschaften

3.1 Räumliche Streueigenschaft

Die klassische Methode zur Bestimmung der Streueigenschaften von strukturierten Oberflächen besteht darin, die räumliche Streueigenschaft in Form von Polardiagrammen zu bestimmen. Dabei wird die zu untersuchte Oberfläche aus einem definierten Einfallswinkel beschallt, und es wird für unterschiedliche Reflexionswinkel der Schalldruck im Fernfeld der Probe bestimmt (siehe auch Abb. 4). Bereits Meyer und Bohn [13] bestimmten im Jahre 1952 auf diese Weise die Abstrahlcharakteristik von periodischen Modellstrukturen. Mittlerweile ist die meßtechnische aber auch rechnerische Ermittlung derartiger Streudiagramme weiterentwickelt worden [3, 14-17]. Darüber hinaus wurden unterschiedliche Vor-



gehensweisen beschrieben, mit denen die räumliche Gleichmäßigkeit der Schallstreuung beurteilt werden soll. Aktuell beschäftigt sich eine AES-Arbeitsgruppe mit dieser Thematik, u.a. um eine objektive Quantifizierung unterschiedlicher Diffusoren zu ermöglichen.

Kaum Berücksichtigung findet dabei jedoch der Umstand, daß die Streuung an den (bei tieferen Frequenzen in der Regel) kleinen Proben sowohl durch die Kantenbeugung wie auch durch die Oberflächenstreuung zustande kommt. Zumeist sind die betrachteten Strukturen Ausschnitte aus großflächigen Verkleidungen, so daß eine näherungsweise Trennung der unterschiedlichen Streuersachen wünschenswert wäre. Aber selbst die Bestimmung des oben definierten Streugrads aus Polardiagrammen ist nicht befriedigend. Zumeist wird eher willkürlich ein Winkelbereich der geometrischen Reflexion definiert.

Wie jedoch im folgenden gezeigt wird, gibt es einen wesentlich eleganteren Weg, aus gemessenen oder berechneten Streudiagrammen den Streugrad zu ermitteln. So zeigt Abb. 4 das Streudiagramm eines Wandpaneels für 1000 Hz, wie es mittels einer BEM-Berechnung für senkrechten Schalleinfall ermittelt wurde [18]. Ebenfalls eingetragen ist das Streudiagramm einer ebenen, schallharten Referenzplatte gleicher Abmessung.

Nun läßt sich der für die Winkel ϑ_i bestimmte Streuschalldruck $\underline{p}_1(\vartheta_i)$ formal in einen Anteil aufteilen, welcher mit dem von der Referenzplatte reflektierten Anteil $\underline{p}_0(\vartheta_i)$ korreliert ist und in einen unkorrelierten Anteil $\underline{p}_s(\vartheta_i)$:

$$\underline{p}_1(\vartheta_i) = r_0 \cdot \underline{p}_0(\vartheta_i) + \underline{p}_s(\vartheta_i) \quad (1)$$

Definitionsgemäß entspricht $r_0 \cdot \underline{p}_0(\vartheta_i)$ dem Anteil der nicht aufgrund der Oberflächenstruktur gestreut wurde und hier als geometrischer Anteil bezeichnet wird. Die für die Berechnung des Streugrads erforderlichen Energieanteile (vgl. auch Abb. 3) erhält man durch die numerische Integration über die Streuwinkel (hier vereinfachend Summation in einer Ebene):

$$E_{geo} \approx \sum_i |r_0 \cdot \underline{p}_0(\vartheta_i)|^2 \quad (2)$$

$$E_{gesamt} \approx \sum_i |\underline{p}_1(\vartheta_i)|^2 \quad (3)$$

Nach Multiplikation von Gleichung (1) mit dem konjugiert komplexen Streuschalldruck $\underline{p}_1^*(\vartheta_i)$ und anschließender numerischer Integration über die Streuwinkel ϑ_i gelangt man zu folgender Beziehung:

$$\sum_i |\underline{p}_1(\vartheta_i) \cdot \underline{p}_1^*(\vartheta_i)| = r_0 \cdot \sum_i |\underline{p}_0(\vartheta_i)|^2 + \sum_i |\underline{p}_s(\vartheta_i) \cdot \underline{p}_s^*(\vartheta_i)| \quad (4)$$

in der der letzte Term vernachlässigt werden kann, da diese Signalanteile unkorreliert sind [19].

Schließlich erhält man mit den oben angegebenen Zusammenhängen den Streugrad zu:

$$\delta = 1 - \frac{|\sum_i \underline{p}_1(\vartheta_i) \cdot \underline{p}_0^*(\vartheta_i)|^2}{\sum_i |\underline{p}_1(\vartheta_i)|^2 \cdot \sum_i |\underline{p}_0(\vartheta_i)|^2} \quad (5)$$

D.h. der Streugrad läßt sich über die quadrierte, normierte Kreuzkorrelationsfunktion der beiden Streudrucke \underline{p}_0 und \underline{p}_1 bestimmen.

Abbildung 5 zeigt einige Ergebnisse, die auf die beschriebene Weise ermittelt wurden. Besonders anschaulich kann der Verlauf des Streugrads der Rechteckleistenstruktur erklärt werden: Das erste Maximum ist bei einer Frequenz zu verzeichnen, bei der die Strukturweite gerade ein Viertel der Wellenlänge beträgt (hier: 430 Hz).

Des weiteren ist es auch möglich, $\underline{p}_s(\vartheta_i)$ und $r_0 \cdot \underline{p}_0(\vartheta_i)$ und somit den Einfluß der Oberflächenstreuung und Kantenbeugung näherungsweise zu trennen, was jedoch bislang noch nicht weiter verfolgt wurde.

Wird die beschriebene Vorgehensweise nicht rechnerisch, sondern meßtechnisch angewendet, so sollte dies zweckmäßigerweise mit modernen Meßmethoden zur Bestimmung

von Impulsantworten erfolgen [20]. Dabei muß sehr empfindlich darauf geachtet werden, daß die Phasenbeziehungen reproduzierbar sind. Es werden also eine genaue Proben-, Lautsprecher- und Mikrofonpositionierung sowie konstante

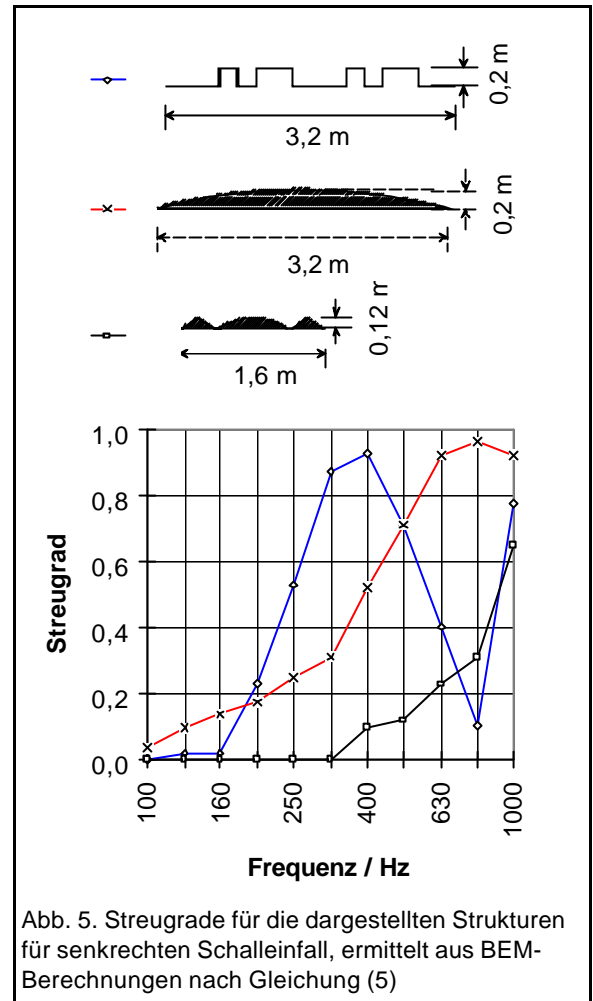


Abb. 5. Streugrade für die dargestellten Strukturen für senkrechten Schalleinfall, ermittelt aus BEM-Berechnungen nach Gleichung (5)

Ausbreitungsbedingungen erforderlich.

3.2 Direkte Bestimmung des einfallswinkelabhängigen Streugrades

Nun ist die oben beschriebene Vorgehensweise zur Bestimmung des Streugrads sehr aufwendig und lediglich gerechtfertigt, wenn man an der genauen räumlichen Abstrahlcharakteristik interessiert ist. Soll lediglich der Streugrad ermittelt werden, so kann dies auch direkt erfolgen [21].

Das Meßprinzip läßt sich am einfachsten veranschaulichen, indem der Einfluß einer schallstreuenden Oberfläche auf reflektierte, bandbegrenzte Impulse betrachtet wird. So sind in Abbildung 6 drei Reflexionen übereinandergeschrieben, die für eine jeweils geringfügig verschobene Modellstruktur ermittelt wurden. Definitionsgemäß sind auch hier die geometrisch reflektierten Anteile von Messung zu

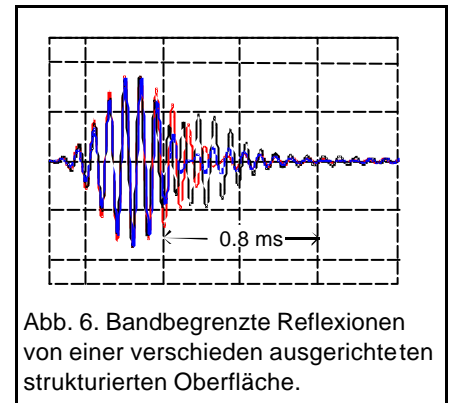


Abb. 6. Bandbegrenzte Reflexionen von einer verschiedenen ausgerichteten strukturierten Oberfläche.

Messung vollständig korreliert, während sich die gestreuten Signalanteile abhängig von der Probenorientierung ändern. Es läßt sich wiederum durch kohärente Mittelung der geometrisch reflektierte Schallanteil extrahieren und bei Kenntnis der insgesamt reflektierten Energie der einfallswinkelabhängige Streugrad ermitteln. Wie in [12] gezeigt ist, erfolgt dabei die Messung vorteilhafterweise breitbandig und die Signalverarbeitung im Frequenzbereich. Auf diese Weise läßt sich neben dem Streugrad auch der frequenzmäßig hochaufgelöste geometrische Reflexionsfaktor nach Betrag und Phase ermitteln. Die praktische Vorgehensweise ist im wesentlichen an die In-situ-Messung des Absorptionsgrades nach der Reflexionsmethode angelehnt [22]. Auch kann aus den für unterschiedliche Einfallswinkel ermittelten Ergebnissen mit Hilfe der Parisschen Formel der Streugrad für allseitigen Schalleinfall berechnet werden [12].

3.3. Messung des Streugrads für allseitigen Schalleinfall

Nun erfolgt die Ermittlung des Absorptionsgrades für allseitigen Schalleinfall bekannterweise zumeist durch Messungen der Nachhallzeiten im Hallraum gemäß:

$$\alpha = 55,3 \cdot \frac{V}{cS} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (6)$$

c Schallgeschwindigkeit

S Probenoberfläche

T_1, T_2 Nachhallzeit im Hallraum ohne / mit Probe

Und auch für die Bestimmung des Streugrads kann analog ein Hallraumverfahren angegeben werden [23] [12] [24].

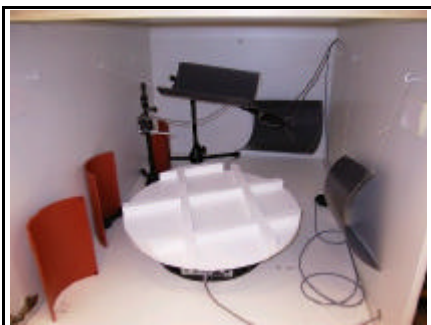


Abb. 7. Modellhallraum mit Ausschnitt aus einer Kassettendecke im M 1:10

Dabei wird die zu untersuchende kreisrunde Probe auf einem Drehteller zentriert, wie dies in Abb. 7 gezeigt ist. Sender und Empfänger befinden sich an festen Positionen im Raum, während die Probe von Messung zu Messung um einen Winkelschritt $\Delta\varphi$ gedreht wird. Ist die Oberfläche der Probe homogen und eben, so sind die so ermittelten Impulsantworten vollständig korreliert. Ist hingegen die Oberfläche strukturiert, so ergeben sich Unterschiede in der Feinstruktur. Die Dekorrelation nimmt im Nachhallbereich mit wachsender Zeit zu, da immer mehr Schallanteile auf dem Weg zum Mikrofon an der Prüffläche reflektiert wurden. Summiert man die unter zahlreichen Ausrichtungen der Probenfläche gemessenen Raumimpulsantworten, so erhält man eine Impulsantwort, die gegenüber dem Einzelergebnis schneller abklingt (Abb. 8). Dies wird dadurch hervorgerufen, daß neben der absorbierten Schallenergie sich die von der Probe diffus gestreuten Anteile herausmitteln. Wie in [12] gezeigt ist, kann der Abklingvorgang als Überlagerung von zwei unterschiedlichen Abklingvorgängen gedeutet werden:

$$E_{\text{koh}} \approx \int_0^t n-1 \cdot e^{-0,163 \cdot t/T_3} + e^{-0,163 \cdot t/T_2} \quad (7)$$

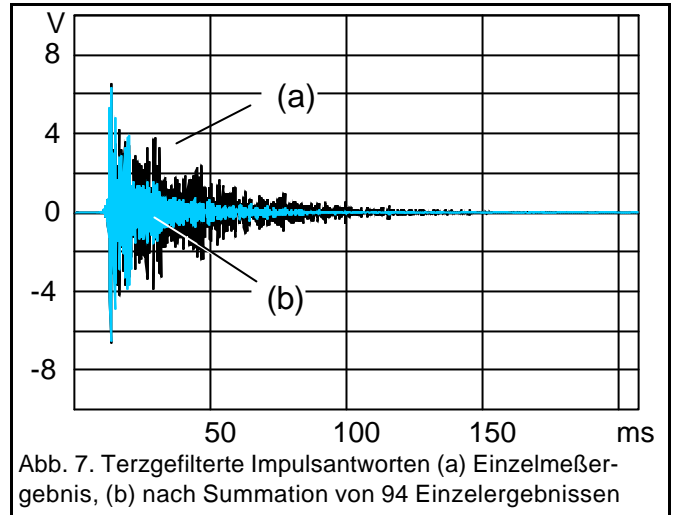


Abb. 7. Terzgefilterte Impulsantworten (a) Einzelergebnis, (b) nach Summation von 94 Einzelergebnissen

was auch praktisch verifiziert wurde. Bei einer ausreichenden Anzahl von Mittelungen ($n \geq 90$) kann der zweite Term vernachlässigt werden und die Auswertung über die integrierte Impulsantwort liefert eine Nachhallzeit T_3 . Ersetzt man so dann in Gleichung (6) die Nachhallzeit T_2 durch T_3 , so erhält man einen „scheinbaren“ Absorptionsgrad a

$$a = 55,3 \cdot \frac{V}{cS} \left(\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_1} \right) = \alpha + \delta(1-\alpha) \quad (8)$$

der sich aus dem Absorptionsgrad α und zusätzlich den diffus reflektierten Anteile $\delta(1-\alpha)$ zusammensetzt, da letztere durch die kohärente Mittelung verlorengegangen sind. Durch Umformen erhält man den Streugrad zu:

$$\delta = \frac{a-\alpha}{1-\alpha} \quad (9)$$

Das auf diese Weise für die in Abbildung 7 gezeigt Musterfläche ermittelte Ergebnis ist in Abb. 9 gezeigt und wurde bei der Modellierung der Kassettendecke in einer raumakustischen Simulation entsprechend berücksichtigt.

Wie auch in diesem Beispiel ist es in praktischen Anwendung zumeist zweckmäßig, die Untersuchungen zur Schallstreuung im Modellmaßstab durchzuführen. Auch ist es möglich, die Messungen nicht schrittweise, sondern bei drehendem Teller durchzuführen wenn Maximalfolgen-Meßsignale oder andere Pseudoräuschsignale ununterbrochen ausgesendet und empfangen werden. Auf diese Weise wird der Zeitaufwand für eine Messung drastisch gemindert.

Selbstverständlich stellt sich die Frage,

wie gut diese Eingangsgröße in der Simulation die relevanten Schallfeldparameter abbilden kann. Diesbezüglich haben erste Vergleiche von Messungen und Simulationen hinsichtlich des energetischen Abklingverhalten in Räumen mit einseitiger Verteilung der Absorptionsflächen eine sehr gute Übereinstim-

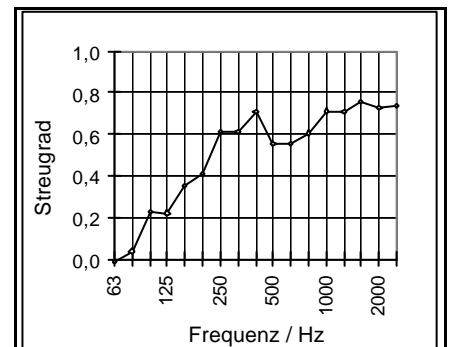


Abb. 9. Streugrad für allseitigen Schalleinfall, ermittelt für die in Abb. 6 gezeigte Kassettendecke (Frequenzen für Originalmaßstab)

lung der Absorptionsflächen eine sehr gute Übereinstim-

mung gezeigt [12]. Weiterführende Untersuchungen stehen jedoch noch aus.

Auch überrascht es nicht, daß derzeit eine ISO-Working Group (ISO/TC 43/SC2/WG25) mit der Ausarbeitung eines entsprechenden Standards betraut ist. In diesem Zusammenhang werden auch Aspekte wie die Probengröße, das Verhältnis von Probenhöhe zu Oberfläche, die Abhängigkeit der Genauigkeit der Ergebnisse vom Absorptionsgrad oder die geeignete Auswertung der Nachhallkurven noch genauer beleuchtet.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Sowohl heutige raumakustische Simulationsverfahren wie auch die Kennzeichnung von Produkten zur Schallstreuung erfordern eine geeignete Charakterisierung der schallstreuenden Wirkung. Im einfachsten Fall kann dies über den Streugrad für allseitigen Schalleinfall erfolgen, der im Hallraum - vorteilhafterweise im verkleinerten Modellmaßstab - bestimmt werden kann. Aber auch aus Streudiagrammen läßt sich, wie hier gezeigt, der Streugrad für bestimmte Einfallrichtungen ermitteln. Die Anwendung dieser Größe ist insbesondere in raumakustischen Simulationsverfahren zu sehen, die auf verfeinerten statistischen Methoden basieren. Für subjektiv besonders wichtige Schallanteile hingegen kann eine genauere Berücksichtigung der winkelabhängigen Reflexion notwendig werden. Dies gilt insbesondere, wenn sich der Empfänger sehr nah an der schallstreuenden Oberfläche befindet. Bestes Beispiel hierfür ist in Auditorien das Publikum selbst. So spielt bei der streifenden Direktschallausbreitung über Publikumsbereichen bei mittleren und hohen Frequenzen sowohl die Streucharakteristik an den Köpfen wie auch an den Schultern eine wichtige Rolle, und dies nach Betrag und Phase [12]. Aber auch wenn es darum geht, die Vermeidung von Echos oder Flatterechos zu beurteilen, ist die Berücksichtigung der Einfallswinkelabhängigkeit der Schallstreuung von Bedeutung.

Folglich besteht noch reichhaltig Bedarf und Potential für die Weiterentwicklung von Simulationsverfahren, bei denen sowohl der subjektive Bedeutung der Reflexionen als auch die physikalischen Gegebenheiten besser als bisher berücksichtigt werden.

5. Literatur

- [1] M. R. Schroeder. Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls: More lateral sound diffusion. *J. Acoust. Soc. Am.* 65 (1979), 958-963.
- [2] H. Kuttruff. Sound absorption by pseudostochastic diffusers. *Applied Acoustics* 42 (1994), 215-231.
- [3] F. Mechel. The wide-angle diffusor -a wide-angle absorber? *Acustica* 81, 1995.
- [4] N. Xiang, J. Blauert. Binaural Scale Modelling for Auralization and Prediction of Acoustics in Auditoria. *Applied Acoustics* 38 (1993), 267-290.
- [5] A. Krokstadt, S. Strom, S. Sorsdal. Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique. *J. Sound Vib.* 8 (1968), 118.
- [6] M. Vorländer. Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit des raumakustischen Schallteilchenmodells, Dissertation RWTH Aachen, 1989.
- [7] B.-I. Dalenbäck. Room acoustic prediction and auralization bases on an extended image source model. Dissertation Chalmers Universität Göteborg 1995.
- [8] D. van Maerke, J. Martin. The prediction of echograms and impulse responses within the Epidaure software. *Applied Acoustics* 38 (1993), 179-194.
- [9] G. Naylor. Odeon-another hybrid room acoustical model. *Applied Acoustics* 38 (1993), 131-144.
- [10] B.-I. Dalenbäck. a macroscopic view of diffuse reflection. 95th AES convention, preprint.
- [11] Fasold, E. Sonntag, H. Winkler. Bauphysikalische Entwurfslehre, Bau- und Raumakustik. VEB Verlag für Bauwesen 1987, S. 270 ff.
- [12] E. Mommertz. Untersuchung akustischer Wandeigenschaften und Modellierung der Schallrückwürfe in der binauralen Raumsimulation. Dissertation RWTH Aachen 1995, Shaker Verlag Aachen.
- [13] E. Meyer, L. Bohn. Schallreflexion an Flächen mit periodischer Struktur. *Akustische Beihefte zur Acustica* 3 (1952).
- [14] H-P. Tennhardt. Akustische Dimensionierung von Faltungsstrukturen mit dreieckförmiger Schnittführung. *Bauforschung-Baupraxis*, H. 229 (1988), 18-32.
- [15] P. D'Antonio. The directional scattering coefficient: experimental determination. *J. Audio Eng. Soc* 40, (1992).
- [16] M. Kleiner, H. Gustafsson, J. Backman. Measurement of Directional Scattering Coefficients Using Near-Field Acoustic Holography and Spatial Transformation of Sound Fields. *J. Audio Eng. Soc.* 45 (1997), 331-346.
- [17] Y. W. Lam. A boundary integral formulation for the prediction of acoustic scattering from periodic structures. *J. Acoust. Soc. Am.* 105 (1999), 762-169.
- [18] H. Horn, E. Mommertz. Die Berechnung der Schallabstrahlung und Schallstreuung technischer Strukturen mit Hilfe der FEM und BEM. CAD-FEM User's Meeting, Fulda, 1997.
- [19] E. Mommertz. Determination of scattering coefficients from the reflection directivity of architectural surfaces. *Applied Acoustics* 60 (2000).
- [20] E. Mommertz, S. Müller. Measuring impulse responses with digitally filtered pseudorandom noise derived from maximum-length sequences. *Applied Acoustics* 44 (1995), 195-214
- [21] M. Vorländer, T. Schaufelberger. Messung des Diffusitätsgrades rauher Flächen. Fortschritte der Akustik, DAGA '90, 827-830.
- [22] E. Mommertz. Angle-dependent in situ measurements of complex reflection coefficients using a subtraction technique. *Applied Acoustics* (1996)
- [23] E. Mommertz, M. Vorländer. Measuring scattering coefficients of surfaces in the reverberation chamber and in the free field. 15th Int. Congr. on Acoustics 1995, Trondheim.
- [24] M. Vorländer, E. Mommertz. Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients. *Applied Acoustics* 60 (2000).