

Sind existierende Dodekaeder optimale Schallquellen für die bau- und raumakustische Messtechnik?

Andreas Nicht, Friedrich Beyer, M. Ercan Altinsoy

Lehrstuhl Kommunikationsakustik, TU Dresden, 01062 Dresden,

E-Mail: andreas.nicht@tu-dresden.de

Einleitung

Zur Bestimmung des akustischen Verhaltens von Räumen werden in der Bau- und Raumakustik Messungen zur Bestimmung der Impulsantwort durchgeführt. Aus dieser lassen sich verschiedene raumakustische Kenngrößen berechnen – zum Beispiel die Nachhallzeit T_{60} , das Deutlichkeitsmaß C_{50} oder das Klarheitsmaß C_{80} .

In der Theorie wird dabei von einer allseitigen Schallausbreitung und -aufnahme ausgegangen. Ideal werden demnach Schallquellen und Sensoren benötigt, welche über den gesamten Messfrequenzbereich eine omnidirektionale Richtcharakteristik aufweisen. Im Gegensatz zu realen Messmikrofonen besitzen elektroakustische Schallquellen frequenzabhängig eine deutliche Richtwirkung. In der Praxis haben sich vor allem Dodekaeder-Schallquellen durchgesetzt – welche durch die Überlagerung der Schallfelder der zwölf Einzellausprecher über den Messfrequenzbereich als Annäherung an eine omnidirektionale Quelle angesehen werden. Betrachtet man die gesamte Messkette, so stellen die verwendeten Schallquellen das kritischste Element, im Vergleich zur Mikrofontechnik oder der Signalverarbeitung, dar [1].

Über das Schallfeld polyedrischer Lautsprechersysteme und den Einfluss von deren Richtwirkung auf die Raumimpulsantwort existieren bereits verschiedene Studien. Hierbei standen große Räume [1], die Lautsprecher-Ausrichtung [2] oder unterschiedliche Polyederformen [3] im Vordergrund.

Gegenstand dieser Untersuchung ist die Frage, wie sich die Richtcharakteristik praktischer Schallquellen auf übliche raum- und bauakustische Messergebnisse auswirkt. Dabei steht die Ermittlung der mittleren Nachhallzeit (in Terzbändern) aus den Raumimpulsantworten im Vordergrund, da dies die Basisgröße der Raumakustik darstellt, und die Basis für Analyse, Planung und Beurteilung bildet. Der Schwerpunkt wurde zudem nicht auf große Säle [1], sondern auf kleine und mittelgroße Räume (250 m^3) gelegt.

Dazu wurden im Rahmen einer Studie verschiedene Messlautsprecher untersucht, ihre Schallfeldeigenschaften erfasst und mit normativen Anforderungen verglichen. Außerdem wurde die Auswirkung auf raumakustische Kenngrößen typischer Raumsituationen untersucht, um Schlussfolgerungen für den praktischen Einsatz zu ziehen.

Schallquellen

Omnidirektionale Schallquellen werden in unterschiedlichsten Bauformen und Größen angeboten. Im Regelfall handelt sich dabei um regelmäßige Polyeder, wobei der Dodekaeder – mit 12 Einzelschallquellen – die häufigste Bauform darstellt. In der Studie wurden insgesamt acht Schallquellen untersucht:

Dodekaeder:

- Norsonic Typ 229
- Norsonic Typ K100
- Outline Globesource
- Brüel & Kjær BBL512
- TOA AN-SP 1236
- Selbstbau (3D-Druck-Gehäuse 25 cm)

sowie

- Brüel & Kjær Omnisource 4295
- Genelec 8250A

Der Brüel & Kjær Omnisource verfügt nur über einen Lautsprecher mit einem sich verengendem Hornansatz. Der Genelec Studiomonitor wurde als gerichtet abstrahlende Vergleichsquelle herangezogen. In Abb. 1 sind exemplarisch vier verwendete Schallquellen unterschiedlicher Bauart dargestellt.



Abbildung 1: Untersuchte Schallquellen (Auswahl): Norsonic Typ 229, Outline Globesource, Selbstbau, Brüel & Kjær Omnisource.

Richtcharakteristik

Normative Anforderungen

Um die Eignung realer Schallquellen hinsichtlich der Forderung nach einer omnidirektionalen Schallausbreitung zu quantifizieren, werden in den Normen für raum- und bauakustische Messung konkrete Anforderungen gestellt. Hierbei sind für raumakustische Messungen in ISO 3382-1 [4] und für bauakustische Messungen in ISO 16283-1 [5] (ersetzt ISO 140-4) Toleranzbereiche für die Richtwirkung angegeben. Dabei wird im Fernfeld ein energetischer Mittelwert des Schalldrucks über gleitende 30° Winkelabschnitte gebildet, und deren maximale und minimale Abweichung vom 360° Mittelwert berechnet. Die Toleranzgrenzen je Oktave (ISO 3382-1) bzw. Terz (ISO 16283-1) sind in Abb. 3 rot dargestellt. Bis 500 Hz liegen diese bei ± 1 dB bzw. ± 2 dB und steigen bis 4 kHz bzw. 5 kHz auf ± 6 dB bzw. ± 8 dB.

Bestimmung der Richtcharakteristika

Zur Bestimmung der Richtcharakteristik wurde das Schallfeld aller untersuchten Schallquellen mit den Klippel *Near Field Scanner* ermittelt. Aus einer Vielzahl von Schalldruckmessungen im Nahfeld wird dabei die Quellcharakteristik der Schallquelle ermittelt, woraus sich im Nachgang der Schalldruckverlauf für beliebige Positionen berechnen und die entsprechend räumliche Verteilung darstellen lässt. In Abb. 2 ist exemplarisch das Schallfeld zweier unterschiedlich großer Dodekaeder in Form von Balloon-Plots für die Frequenzen 1 kHz, 2 kHz und 6 kHz dargestellt.

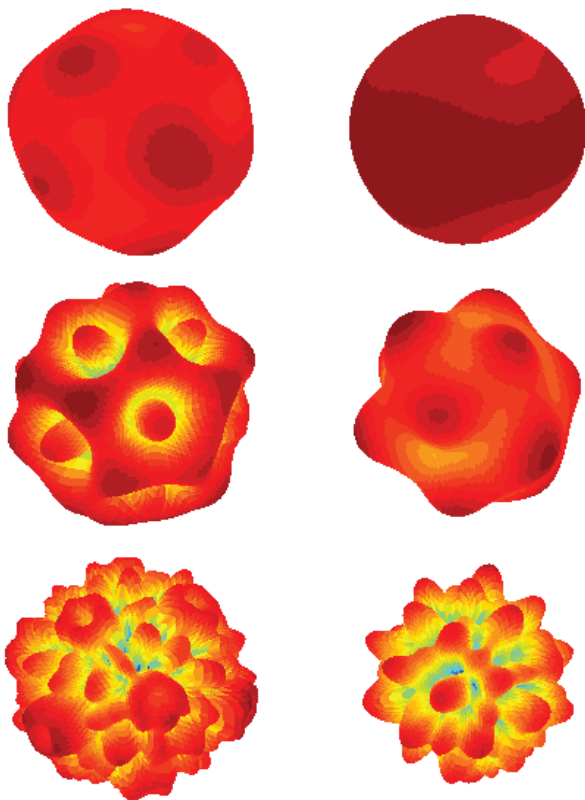


Abbildung 2: Richtcharakteristika für zwei Dodekaeder (links: Norsonic 229, $d_A = 37$ cm; rechts: Selbstbau, $d_A = 25$ cm) für Frequenzen 1 kHz, 2 kHz und 6 kHz.

Vergleich mit ISO-Anforderungen

Aus den ermittelten Richtcharakteristika lassen sich die in Abb. 3 dargestellten Direktivitätsindizes nach ISO 3382-1 [4] und ISO 16283-1 [5] ermitteln.

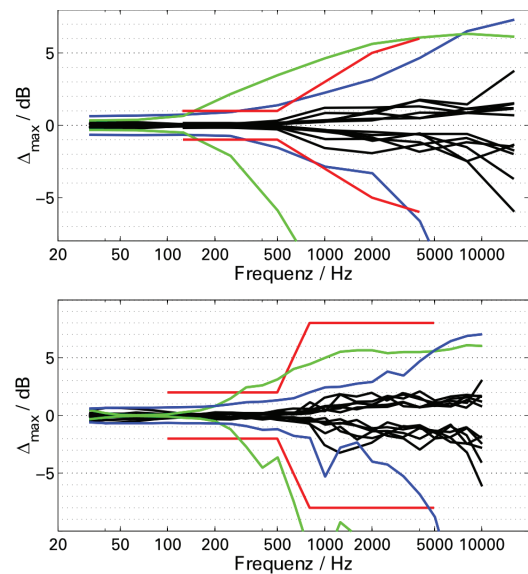


Abbildung 3: Frequenzverlauf der Direktivitätsindizes für Dodekaeder (schwarz), BK Omnisource (grün) und Studiomonitor (blau) im Vergleich mit Toleranzbereich nach ISO 3382-1 (oben) und ISO 16283-1 (unten).

Wie bereits die Balloon-Plots zeigen tritt für die Dodekaeder erst ab ca. 1 kHz eine Richtwirkung auf. Bei hohen Frequenzen nimmt die Dichte von Nebenmaxima stark zu. Auf einen bestimmten Winkelbereich – also auf eine Teilfläche des Raumes – wirkt eine Vielzahl von Maxima und Minima, weshalb die Richtwirkung nicht weiter zunimmt.

Ergebnisse

Es zeigt sich somit, dass alle Dodekaeder die Anforderungen einhalten und ihre Abweichungen deutlich unterhalb der ISO-Grenzwerte liegen. Die Unterschiede zwischen den Modellen sind dabei gering. Die Verschiebung der Grenzfrequenz liegt im Bereich von zwei Terzen. Der untersuchte BK Omnisource entspricht im Wesentlichen den Anforderungen. Der Studiomonitor hingegen, kann nur bis 200 Hz als omnidirektional angesehen werden – oberhalb zeigt er erwartungsgemäß eine deutliche Richtwirkung.

In Anhängigkeit von der Baugröße verschiebt sich die Lage der Richtwirkungs-Grenzfrequenz der Dodekaeder-Lautsprecher. So zeigen kleinere Dodekaeder (z. B. Selbstbau: $d_A = 25$ cm) erst bei höheren Frequenzen eine Richtwirkung als größere Modelle (z. B. Norsonic 229: $d_A = 37$ cm). Aufgrund des geringeren Innenvolumens besitzen sie aber auch eine höhere Resonanzfrequenz ($f_0 = 100 \dots 300$ Hz), was aufgrund der darunter stark abfallenden Schalleistung, ihre Nutzung bei tiefen Frequenzen einschränkt. Dies lässt sich gemäß Leishman et al. [3] auch auf das Schallfeld anderer Polyeder-Quellen übertragen. Die Wahl von Bauform, Gehäusegröße und Treibergröße einer pseudo-omnidirektionalen Quelle stellt somit immer einen Kompromiss hinsichtlich der Schallabstrahlung im Niederfrequenzbereich (Resonanzfrequenz) und Richtwirkung im Hochfrequenzbereich (Richtwirkungs-Grenzfrequenz) dar.

Raumakustik

Raumakustische Messungen

Um für praktische Messungen zu klären, wie sich die reale Richtwirkung auf raumakustische Kenngrößen auswirkt, wurden in folgenden Räumen Messungen durchgeführt.

- Hörsaal BAR-106, 100 Plätze, 250 m³
- Hallraum, 195 m³, leer sowie mit 12 m² Absorber

Die Messungen erfolgten mithilfe eines Matlab-Skripts nach dem Sweep-Verfahren [6] gemäß ISO 18233 [7] an drei Sendepositionen und parallel fünf Empfängerpositionen mit drei Wiederholungen.

Raumakustische Kenngrößen

San Martín et al. [1] zeigten, dass der Einfluss der Richtwirkung für Größen mit langer Integrationszeit (wie T_{60}) deutlich größer ist, als für Größen mit kurzer Integrationszeit (wie C_{50}). Knüttel et al. [2] zeigten jedoch auch, dass der Einfluss der Quellcharakteristik und Ausrichtung sich nicht nur auf die frühen Reflexionen bezieht, sondern, aufgrund der konstanten räumlichen Eigenschaften des Raumes, über die gesamte Zeit der Impulsantwort nachweisbar ist – auch bei zunehmender Dichte der Reflexionen.

Daher wurden aus den Datensätzen von Raumimpulsantworten des Hörsaals zum einen der Terzverlauf der Nachhallzeit T_{60} und zum anderen das Deutlichkeitsmaß C_{50} (Oktavbereich 500 Hz–2 kHz) bestimmt.

Aus den Messungen im Hallraum wurden über die Terznachhallzeiten der Absorptionsgrad α einer Absorber-Probe bestimmt.

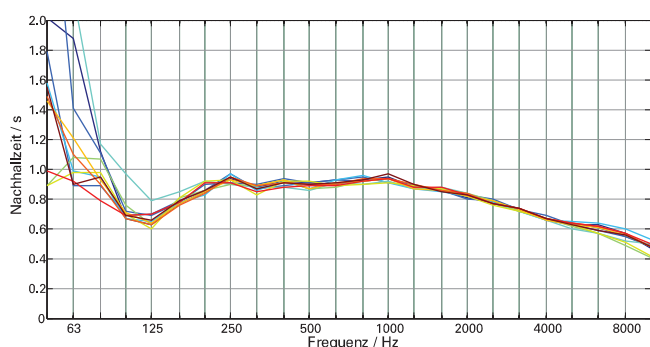


Abbildung 4: Mittlere Nachhallzeitverläufe T_{60} für alle Schallquellen im Hörsaal.

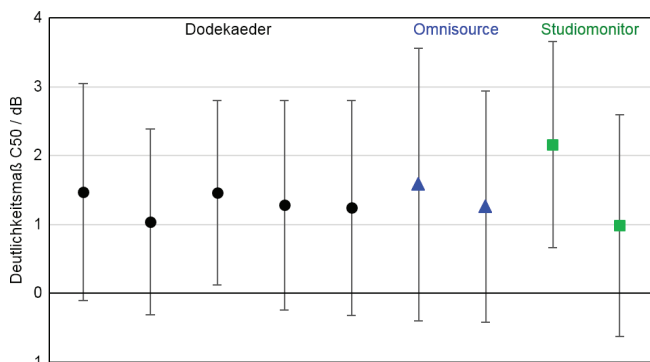


Abbildung 5: Deutlichkeitsmaße C_{50} (Mittelwert $\pm s_{Pos}$), Dodekaeder (schwarz); Omnisource (blau), Genelec (grün).

Ergebnisse

Die ermittelten Nachhallzeitverläufe zeigen im mittleren Frequenzbereich¹ nur minimale Abweichungen. So ist die Streuung zwischen den Messergebnissen für die unterschiedlichen Schallquellen v_{SQ} deutlich geringer, als die mittlere Streuung zwischen den Messpositionen \bar{v}_{Pos} , ($v_{SQ} \ll \bar{v}_{Pos}$ mit $v_{SQ} = 2\%$, $\bar{v}_{Pos} = 8\%$). Der Einfluss der Quelle auf die Ergebnisse ist somit deutlich geringer als der Einfluss der Wahl der Sender- und Empfängerposition. Hierbei zeigt sich kein systematischer Unterschied zwischen den omnidirektionalen Schallquellen (Dodekaeder und BK Omnisource) und dem gerichteten Studiemonitor.

Zusätzlich wurden Messungen mit unterschiedlichen Ausrichtungen des Studiemonitors und des BK Omnisource durchgeführt. Auch hierbei zeigten sich für die Nachhallzeiten keine systematischen Unterschiede – die Streuungen entsprechen denen der omnidirektionalen Quellen. Auch für diese zeigt sich demnach kein relevanter Einfluss auf die Bestimmung der Nachhallzeit.

Betrachtet man das Deutlichkeitsmaß C_{50} , welches eine deutlich geringere Integrationszeit besitzt, so liefern alle Schallquellen vergleichbare Ergebnisse. Die Streuung liegt mit $s_{SQ} = 0,35$ dB deutlich unter der Unterscheidungsschwelle ($JND = 1,1 \dots 2,5$ dB [8] [9]). Auch der gerichtete Studiemonitor liefert in diesem Sinne noch gültige Ergebnisse. Allerdings zeigen sich für dessen unterschiedliche Ausrichtungen bereits bis zu 1,1 dB verschiedene Mittelwerte.

Dieser Effekt skaliert sich mit der Integrationszeit, so ist die Streuung für das Klarheitsmaß C_{80} geringer ($s_{SQ} = 0,30$ dB) und für das Direktschallmaß C_5 deutlich größer ($s_{SQ} = 0,48$ dB ohne Studiemonitor). Für C_5 weichen die Ergebnisse für unterschiedliche Ausrichtungen des Studiemonitors bereits um 8 dB ab. Für eine Bestimmung von C_5 in diesem Raum ist er demnach nicht geeignet.

Untersuchungen für große Säle [1] zeigten ebenfalls nur einen geringen Einfluss der Schallquelle und Ausrichtung auf die Nachhallzeit. Die Unterschiede für C_{50} und C_{80} lagen aber über den Unterscheidungsschwellen. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass auch die relativ kurze Integrationszeit von C_{50} im Falle des Hörsaals bereits dem 1,2-fachen der Raumdiagonale entspricht, weshalb hier eine Vielzahl von Reflexionen einbezogen wird.

Aufgrund der hohen Diffusität des Hallraums zeigen sich für die Bestimmung des Absorptionsgrades α nur minimale Abweichungen zwischen unterschiedlichen Schallquellen und Ausrichtungen. Auch für extrem unterschiedliche Quellausrichtungen (direkt auf Absorber, Raumecke, Raummitte) zeigten sich keine systematischen Unterschiede.

¹ Die hohe Streuung der Messwerte unter 100 Hz lässt sich, aufgrund der hier jeweils kugelförmigen Schallausbreitung, nur durch den geringen Pegel der Quellen unterhalb der Resonanzfrequenz erklären.

Zusammenfassung

Reale Schallquellen können die ideale Forderung nach einer breitbandig omnidirektionalen Schallabstrahlung nur näherungsweise erfüllen. Diese Abweichungen vom Ideal machen die Schallquelle zum kritischen Element der Messkette.

Für sieben verschiedene pseudo-omnidirektionale Schallquellen konnte gezeigt werden, dass sie die ISO Anforderungen für bau- und raumakustische Messungen einhalten. Dabei können die bis zu ihrer Richtwirkungs-Grenzfrequenz von ca. 1 kHz als kugelförmig abstrahlend angesehen werden, oberhalb dieser Frequenz nimmt ihre Richtwirkung zu. Aufgrund der zunehmenden Dichte von Nebenmaxima steigt der Direktivitätsindex aber auch für höhere Frequenzen nicht über ± 2 dB.

Obwohl sich der Einfluss der Richtcharakteristik beinahe über den gesamten Verlauf der Impulsantwort nachweisen lässt [2], ist er für verschiedene raumakustische Kenngrößen von unterschiedlich großer Bedeutung. Generell nimmt der Einfluss, aufgrund der zunehmenden Dichte an Reflexionen, mit steigender Integrationszeit des betrachteten raumakustischen Parameters ab. Für sehr große Räume ist der Einfluss der Richtwirkung daher nur für die Ermittlung der Nachhallzeit zu vernachlässigen [1]. Für mittelgroße Räume (Büro-, Seminarräume, kleine Hörsäle) sind die Laufzeiten der reflektierten Schallanteile deutlich kürzer. Daher wird hier auch bei der Berechnung von Deutlichkeitsmaß und Klarheitsmaß ($T = 50 \dots 80$ ms) bereits eine hohe Zahl von Reflexionen berücksichtigt, was zur Verminderung des Einflusses der Richtwirkung führt.

Es lässt sich daher feststellen, dass für diese Räume die Richtwirkung und Ausrichtung der Schallquelle sowohl für die Bestimmung der Nachhallzeit T_{60} als auch des Deutlichkeitsmaß C_{50} und Klarheitsmaßes C_{80} keinen relevanten Einfluss hat. Für diese Messungen sind daher (bei ausreichender Diffusität) alle gängigen omnidirektionalen und gerichteten Schallquellen geeignet.

Danksagung

Besonderer Dank für die messtechnische Unterstützung der vorliegenden Studie gilt der Akustik Bureau Dresden GmbH sowie der Klippel GmbH.

Literatur

- [1] R. San Martín, I. B. Witew, M. Arana, M. Vorländer: Influence of the Source Orientation on the Measurement of Acoustic Parameters. *Acta Acustica united with Acustica* 93, S. 387–397, 2007.
- [2] T. Knüttel, I. B. Witew, M. Vorländer: Influence of “omnidirectional” loudspeaker directivity on measured room impulse responses. *J. Acoust. Soc. Am.* 134, S. 3654–3662, 2013.
- [3] T. W. Leishman, S. Rollins, H. M. Smith: An experimental evaluation of regular polyhedron loudspeakers as omnidirectional sources of sound. *J. Acoust. Soc. Am.* 120, S. 1411–1422, 2006.
- [4] ISO 3382-1: Akustik – Messung von Parametern der Raumakustik. Teil 1: Aufführungsräume. 2009.
- [5] ISO 16283-1: Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau. Teil 1: Luftschalldämmung. 2014.
- [6] A. Farina: Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. *108th AES Convention*, 2000.
- [7] ISO 18233: Akustik – Anwendung neuer Verfahren in der Bau- und Raumakustik. 2006.
- [8] J. S. Bradley, R. Reich, S. G. Norcross: A just noticeable difference in C_{50} for speech. *Applied Acoustics* 58, S. 99–108, 1999.
- [9] R. Höhne, G. Schroth: Zur Wahrnehmbarkeit von Deutlichkeits- und Durchsichtigkeitsunterschieden Zuhörersälen. *Acustica* 81, S. 309–319, 1995.