

Entwicklung eines verbesserten raumakustischen Messlautsprechers für Raumimpulsantwortmessungen

Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz¹, Martijn Vercammen²

¹ Peutz Consult GmbH, Simrockallee 2, D-53173 Bonn, E-Mail: khl@peutz.de

² Peutz bv, Lindenlaan 41, NL-6585 ZH Mook, E-Mail: m.vercammen@mook.peutz.nl

Einleitung

Für Messungen von Raumimpulsantworten mit der Korrelationstechnik werden oft Lautsprecher als Quellen verwendet, vielfach Dodekaeder unter Verzicht auf die Omnidirektionalität höherer Frequenzen. Die Weiterentwicklung des Alternativkonzeptes Punktquelle wird beschrieben und mit üblichen Systemen verglichen.

Anforderungen an Messschallquellen

An Messschallquellen für Impulsantwortmessungen sind Forderungen zu stellen hinsichtlich ihrer Reproduzierbarkeit, Wiederholbarkeit, Omnidirektionalität, ihrer Impulsantwort (flaches Frequenz- und lineares Phasenspektrum) sowie ihren Maximalpegel. Oft werden Lautsprecher als Quellen verwendet, da selbst LTI-(linear time invariant) Systeme.

Omnidirektionalität: In ISO 3382 [1] wird die Forderung an Messschallquellen zur Messung der Nachhallzeit und daraus abgeleiteter raumakustischer Parameter gestellt, dass die verwendete Schallquelle so omnidirektional wie möglich abstrahlen soll, zumal die aus der Impulsantwort berechneten Energieparameter unter der Annahme allseitig abstrahlender Schallquellen definiert sind. In der Norm wird ein zu höheren Frequenzen breiter werdender Toleranzschlauch vorgeschlagen. Quellen für Impulsantwortmessungen sollten deshalb so omnidirektional wie möglich sein, damit die Messergebnisse - insbesondere Pegel und Frequenzgehalt des Direktschalls - möglichst nur von der Position der Schallquelle, nicht jedoch von ihrer Ausrichtung abhängen. Zudem sollten alle potenziell echogefährlichen Reflexionen eines Messpfades gleichermaßen angeregt werden, nicht nur diejenigen, deren verursachende Geometrien in den Vorzugsabstrahlrichtungen der Quelle liegen, denn sonst müsste man viele Messungen mit unterschiedlichen Ausrichtungen der Quelle durchführen [2].

Nur bei einer kleinen allseitig gleichförmigen abstrahlenden Quelle kann man sicher sein, alle potenziell echogefährlichen Reflexionen eines Messpfades mit einer einzigen Messung zu erfassen. Optimal wäre daher eine Omnidirektionalität von vorzugsweise $< \pm 1$ dB im interessierenden Frequenzbereich, da die Richtcharakteristik direkten Einfluss hat auf den Direktschall und viele raumakustische Parameter vom Direktschallpegel abhängen.

Impulsantwort/Frequenzgang: Wie alle Glieder einer Messkette zur Erfassung von Impulsantworten eines LTI-Systems sollten insbesondere die verwendeten Messschallquellen eine Impulsantwort aufweisen, welche einem Dirac-Impuls so nahe wie möglich kommt, um die Messung so wenig wie möglich zu verfälschen. Bezüglich des frequenzabhängigen Übertragungsmaßes bedeutet dies,

das dieses (bei linearem Phasengang) über den betrachteten Frequenzbereich so konstant sein sollte wie möglich (± 6 dB über den interessierenden Bereich). Für die Oktavbänder der Mittenfrequenzen 125 Hz - 8k Hz ist der zu fordernde Übertragungsbereich ca. 88 - 11k Hz.

Maximalpegel: Der Schallpegel, der von der Schallquelle ohne Signalverzerrungen erzeugt werden kann, soll so hoch sein, dass das Signal-/Rausch-Verhältnis der Impulsantwort in allen interessierenden Frequenzen für die Auswertung ausreichend ist (≥ 35 dB). Wünschenswert wären Pegel von ≥ 95 dB in 1 m Abstand von der Quelle bei üblichen Werten des Hintergrundschallpegels in Auditorien.

Dilemma Omnidirektionalität-tiefe Frequenzen

Der wünschenswerte Übertragungsbereich überstreicht sieben Oktaven, was sehr hohe Anforderungen an die verwendeten Lautsprecher stellt: einerseits sollen tiefe Frequenzen mit hoher Energie abgestrahlt werden können, zumal zumeist genau dort das Hintergrundrauschen in Räumen seine höchsten Pegel aufweist. Dies ist jedoch nur mit großen Volumenbewegungen (Membranfläche x Hub) möglich, also mit großen Dimensionen. Volumenquellen mit Abmessungen $d \ll \lambda$ strahlen omnidirektional ab. Ab $d > \lambda/4$, also für höhere Frequenzen, ist die Omnidirektionalität begrenzt, da es sich für diese Frequenzen nicht mehr um Volumenquellen handelt. Für die sichere Wiederholbarkeit von Raumimpulsantwortmessungen und eine allseitig gleiche Anregung von Reflexionen sind ausgedehnte Schallquellen also nicht optimal, besser wären Quellen mit Abmessungen $d \ll \lambda$ und kohärenter, interferenzfreier und gleichförmiger Abstrahlung in alle Richtungen.

Kompromisslösung Dodekaederlautsprecher

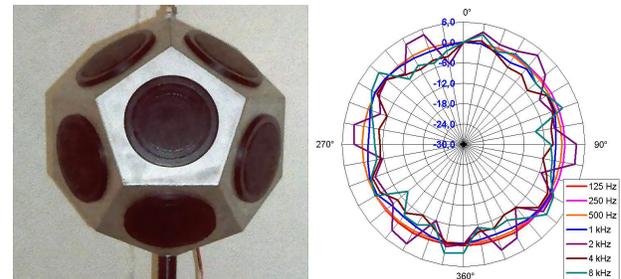


Abbildung 1: Dodekaeder-Lautsprecher und horizontales Polardiagramm im reflexionsarmen Raum, Abstand: 1,5 m

Beispiel für eine Kompromisslösung dieses Dilemmas sind die wegen ihres hohen Pegels bei tiefen Frequenzen viel verwendeten Dodekaeder-Lautsprecher, bei denen in den zwölf Flächen des Dodekaeders jeweils ein Breitbandchassis in Richtung der jeweiligen Flächennormale abstrahlt.

Der Kompromiss wurde hier zugunsten des erreichbaren Pegels bei tiefen Frequenzen auf Kosten der Richtcharakteristik gewählt, siehe horizontales Polardiagramm in Abbildung 1. Die typischerweise $d \approx 0,5$ m großen Dodekaeder sind oberhalb der 1-kHz Oktave keine Volumenquellen mehr; mit Abweichungen $> \pm 4$ dB liegt keine ausreichende Omnidirektionalität mehr vor. Für eine wiederholbare und allseitige Anregung aller Reflexionen müssten mit Dodekaedern eigentlich mehrere Messungen verschiedener Ausrichtung gemittelt werden.

Alternativkonzept: Optimierter Punktstrahler

Omnidirektionalität: das Alternativkonzept beruht darauf, einen in der Medianebene rotationssymmetrischen Punktstrahler zu entwickeln, also eine Volumenquelle mit Abmessungen der Fläche, auf welcher die Luftbewegung auftritt, klein gegen die Wellenlänge. Mit einem einzelnen punktförmigen Strahler kann eine Punktquelle gut simuliert werden und somit eine kohärente, interferenzfreie Abstrahlung; wenn es sich um eine in der Medianebene komplett rotationssymmetrisch abstrahlende Geometrie handelt, somit auch für höhere Frequenzen weitestgehend omnidirektional, bei denen die Abmessungen nicht mehr deutlich kleiner sind als die Wellenlänge. Punktstrahler bedeutet dabei, dass die Schallaustrittsöffnung für den angestrebten Frequenzbereich nicht größer sein sollte als ca. $\lambda/4$. Jedoch muss auch die Schallenergie der tiefen Frequenzen durch die kleine Öffnung, so dass hier ein Kompromiss eingegangen werden muss: gewählt wurden 2 cm, entsprechend $\lambda \approx 8$ cm (entsprechend ca. 4 kHz). Da eine effektive Schallerzeugung für tiefe Frequenzen größere Dimensionen des Erzeugers als 2 cm erfordert, musste die Schallerzeugung räumlich vom Abstrahlungspunkt getrennt werden. Zwischen größerem Lautsprecher und kleinerer Austrittsöffnung ist ein gleitender geschlossener Übergang nötig, es resultiert eine Konusform. Hier sind Punktöffnung und schallerzeugender Lautsprecher 0,5 m entfernt, kleinere Abstände ergaben für die Abmessungen des verwendeten Treibers keine ausreichende Omnidirektionalität. Ergebnis: Bis inklusive der 2 kHz Oktave ist die Richtcharakteristik omnidirektional, darüber beginnen in der Vertikalebene Abweichungen, siehe Abbildung 2, wegen der Rotationssymmetrie aber nicht in der Horizontalebene.

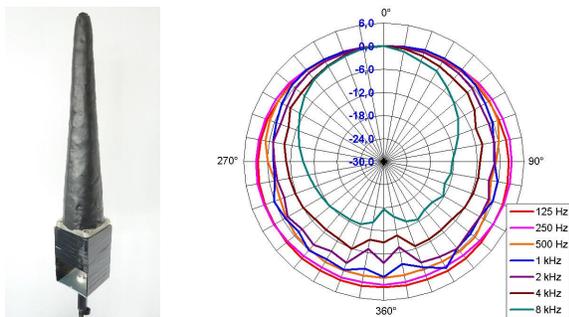


Abbildung 2: Neue Punktquelle und vertikales Polardiagramm im reflexionsarmen Raum, Abstand: 1,5 m

Das Konzept beinhaltet zu optimierende Nachteile: Sekundärabstrahlung über Gehäuse und Konus, nicht konstanter Frequenzgang durch interne Reflexionen, und begrenzter Maximalpegel, vor allem bei tiefen Frequenzen.

Sekundärabstrahlung: Der Punktquellenöffnung und Schallerzeuger verbindende Konus wurde aus ausreichend schwerem Material gefertigt und schalldicht am Treiber befestigt, um sekundäre Schallabstrahlungen an der Verbindung und über den Konusmantel zu minimieren.

Frequenzgang: Durch den Impedanzübergang an der Konusöffnung ins Freie entstehen im Konus Reflexionen und stehende Wellen, welche sich im Frequenzgang als Kammfiltereffekte bemerkbar machen. Bei längeren Koni würde der Kammfilter im Frequenzgang stärker und träte bei niedrigeren Frequenzen auf; bei kürzerem Abstand zwischen Membran und Reflexionsort nimmt die Laufzeit ab und steigt die Frequenz, ab der sich dieser Kammfiltereffekt ausbildet, über den interessierenden Frequenzbereich hinaus. Daher ist der neuen Quelle ca. 2 cm oberhalb des anregenden Lautsprechers eine Lage aus speziell perforiertem Metall angebracht, deren absorbierende Oberfläche die Reflexionen von der Konusspitze stark dämpft und den Frequenzgang begradigt, siehe Abbildung 3.

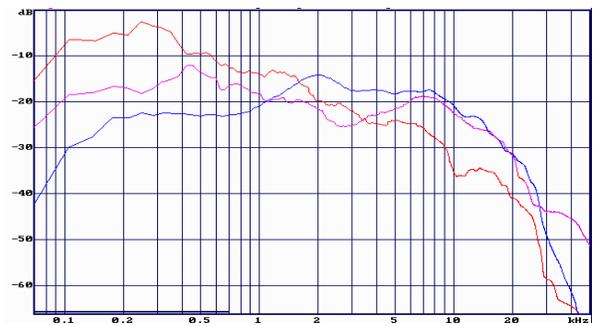


Abbildung 3: Relative Frequenzgänge (0°) im Vergleich; Orange: Dodekaeder; Blau: Basistreiber; Pink: neue Quelle

Tabelle 1: Vergleich der Messschallquellen

Lautsprecher	Omnidirektionalität (± 4 dB)	Frequenzbereich (± 6 dB)
Dodekaeder	100 Hz – 1, kHz	70 Hz – 2 kHz
Punktstrahler	100 Hz – 4 kHz	100 Hz – 12 kHz

Maximalpegel: Der maximal erreichbare Pegel hängt stark vom verwendeten Wandler ab. Um einen möglichst hohen Pegel breitbandig und ausreichend verzerrungsfrei abstrahlen zu können, wird ein pegelstarker Breitband-Miniatur-Lautsprecher verwendet. Von diesem wird mit Konus ein Pegel von ca. 87 dB in 1m Abstand praktisch verzerrungsfrei erreicht - für viele Auditorien ausreichend.

Zusammenfassung

Für Messungen von Raumimpulsantworten wurde eine Punktschallquelle entwickelt und optimiert, welche bei einem Frequenzspektrum (± 6 dB) von ca. 100 Hz bis 12 kHz eine deutlich verbesserte Omnidirektionalität bis 4 kHz ($< \pm 4$ dB) aufweist, in der Horizontalebene wegen ihrer Rotationssymmetrie sogar darüber hinaus.

Literatur

- [1] ISO 3382 (1997) bzw. DIN EN ISO 3382 (2008)
- [2] Vorländer, M. et al.: Influence of the Source Orientation on the Measurement of Acoustic Parameters, Acta Acustica 2007
- [3] Behler, G.: Dodekaeder - Lautsprecher mit variabler Richtcharakteristik, Fortschritte der Akustik - DAGA 2007