Ein breitbandiges Ultraschall-Messsystem für raumakustische Anwendungen im physikalischen Modell

Robert Hupke, Sanam Moghaddamnia, Jürgen Peissig
Institut für Kommunikationstechnik, Leibniz Universität Hannover, 30167 Hannover, Deutschland
Email: RobertHupke@gmail.com, {sanam.moghaddamnia,peissig}@ikt.uni-hannover.de

Einleitung

Im Rahmen der Sanierung des Kuppelsaals, einem Konzertsaal im Congress Centrum Hannover mit Raum für 3600 Personen, wurde in Zusammenarbeit mit der Universität Hannover und der Firma Sennheiser electronic im Vorfeld der Sanierungsarbeiten ein raumakustisches Modell gebaut. Aufgrund der runden Primärform des Kuppelsaals und den daraus resultierenden problembehafteten akustischen Verhältnissen sollten in dem Halbmodell zusätzlich zur Simulation raumakustische Messungen durchgeführt werden. Wegen der verhältnismäßig großen Ausmaße des Originalraumes mit einem Raumdurchmesser von 42 m wurde das Modell in einem Maßstab von 1:25 gebaut. Demzufolge wurde die Messapparatur dem Maßstab entsprechend angepasst und der zu messende Frequenzgang in einen Bereich von 3.1 kHz bis 100 kHz skaliert.

Im Folgenden wird ein breitbandiges Ultraschall-Messsystem vorgestellt, um akustische Messungen zur Ermittlung der Raumimpulsantwort im Maßstab 1:25 durchzuführen. Hierfür wurde ein Prototyp eines Miniaturdodekaeders als Schallquelle aus elektrodynamischen 7 mm Wandlersystemen (Sennheiser IE Serie) entwickelt. Der Miniaturdodekaeder wurde hinsichtlich seiner akustischen Eigenschaften charakterisiert und mit der für den Originalraum bestehenden Norm DIN EN ISO 3382-1 verglichen [1]. Abschließend wurden im physikalischen Raummodel des Kuppelsaals erste Orientierungsmessungen zur Bestimmung der Raumimpulsantwort durchgeführt.

Nichtlinearitäten

Aufgrund der kleinen Bauform stellt der Dodekaeder in dem Messsystem die Hauptquelle für auftretende Nichtlinearitäten dar [2, 3]. Bei dem sehr kleinen Wandlersystem entstehen während des Betriebs bei hohen Pegeln Nichtliniaritäten. Zur Charakterisierung eines akustischen Systems ist die Verwendung eines Exponentiellen Sinus Sweeps (ESS) eine etablierte und weit verbreitete Methode [4]. Eine mathematische Definition des ESS im Zeitbereich ist von Farina gegeben durch

$$x(t) = sin\left[\frac{\omega_1 \cdot T}{ln\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} \cdot \left(e^{\frac{t}{T}\cdot ln\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} - 1\right)\right]. \qquad (1)$$

Hierbei ist T die Zeitdauer des ESS. Mit der Startfrequenz ω_1 beginnt der ESS um mit der Endfrequenz bei ω_2 zu enden. Die Anregung mit einem ESS hat den Vorteil, dass durch Faltung des gemessenen Signals mit der zeitlichen Inversen des Sweep-Signals, schematisch dargestellt in Abb. 1, die linearen Anteile von den nichtlinearen Anteilen in der resultierenden Impulsantwort separiert werden können. Da die nichtlinearen Anteile hauptsächlich vom Lautsprecher erzeugt werden, sind diese für die raumakustische Messung nicht weiter von Bedeutung. Des Weiteren erreicht die ESS-Methode einen höheren SNR als andere Messmethoden [4].

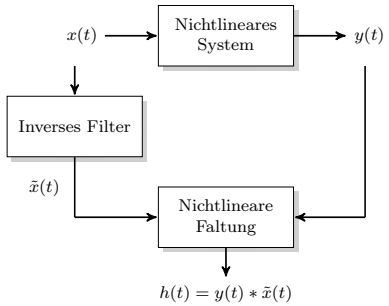

Abbildung 1: Blockschaltbild der nichtlinearen Faltung

Dodekaeder und Messaufbau

Der Prototyp des Dodekaeders, dargestellt in Abb. 2, besteht aus zwölf SYS7 Wandlern der Sennheiser IE 800 Serie und besitzt einen Durchmesser von 2 cm. Bei den Wandlern handelt es sich um elektrodynamische Lautsprecher mit einem Membrandurchmesser von 7 mm. Wie in Abb. 3 schematisch skizziert ergibt sich durch die parallele Verschaltung von jeweils drei Wandlern in Reihe eine Gesamtimpedanz von 12.75 Ω.

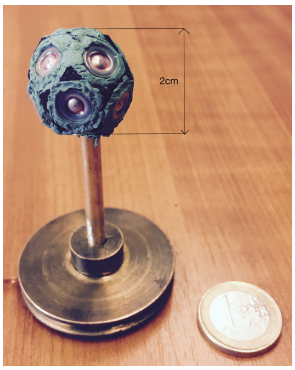

Abbildung 2: Prototyp des Ultraschall-Dodekaeder

Die Signalgenerierung, Ansteuerung, Signalverarbeitung und Auswertung erfolgte mit MATLAB. Das Messsystem ist schematisch in Abb. 4 dargestellt und besteht aus

- DA/AD Wandler NI USB-6361
- linearer Verstärker
- Dodekaeder-Lautsprecher
- 1/8 Zoll Mikrofon B&K Type 4138
- Mikrofonvorverstärker B&K Nexus Type 2609

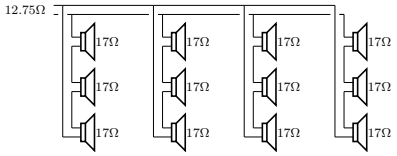

Abbildung 3: Innere Verschaltung des Dodekaeders

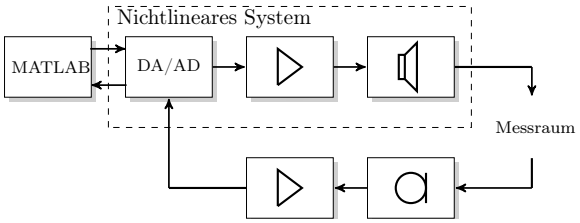

Abbildung 4: Blockschaltbild des Versuchsaufbaus

Akustische Anforderungen

Die Vorgabe beim Bau des Dodekaeder war es, eine breitbandige, möglichst reproduzierbare sowie lineare Schallquelle zu entwickeln. Um die akustischen Eigenschaften dieser Quelle zu charakterisieren wurde die DIN EN ISO 3382-1 an den Modellmaßstab 1:25 angepasst. Im Folgenden werden zusätzlich zu den skalierten Frequenzen für den Modellraum die dazugehörigen Frequenzen im Originalraum in Klammern aufgeführt. Auf Grund der Skalierung mit dem Maßstab 1:25 ergaben sich folgende Bedingungen für die Schallquelle:

- Frequenzgang von 3.1 kHz (125 Hz) bis 100 kHz (4 kHz)
- Ausreichend hoher Pegel innerhalb des Frequenzgangs in allen Oktavbändern
- Möglichst ungerichtete Schallquelle innerhalb der höchstzulässigen Abweichungen.

Frequenzgang

Der Frequenzgang wurde in 10 cm Entfernung zum Dodekaeder mit einem ESS als Anregungssignal gemessen. Der 1/3 Oktav-Frequenzgang des Schalldruckpegels ist in Abb. 5 dargestellt und weist einen maximalen Schalldruckpegel von 92 dB/SPL bei 4 kHz (160 Hz) und 40 kHz (1.6 kHz) auf. Der Frequenzgang ist innerhalb des geforderten Frequenzbereiches von 3.1 kHz (125 Hz) bis 100 kHz (4 kHz) mit einer maximale Abweichung von ± 3 dB/SPL annähernd linear.

Die Abweichungen wurden durch ein inverses Filter zur Linearisierung des Frequenzgangs kompensiert. Verglichen mit anderen Arbeiten [5, 6] erzielt der Miniaturdodekaeder ähnliche Ergebnisse.

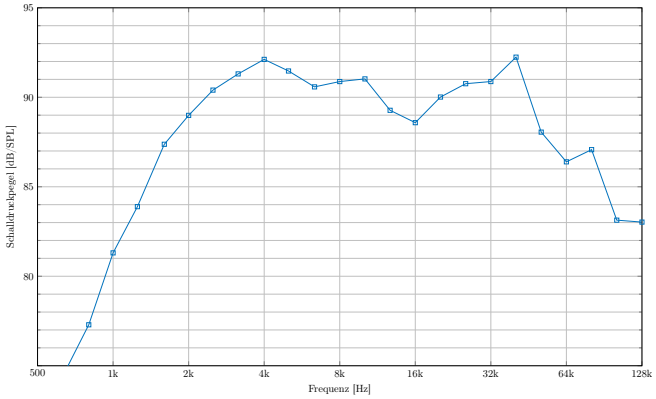

Abbildung 5: Terz-Schalldruckpegel des Frequenzgangs in 10 cm Entfernung zum Dodekaeder

Richtcharakteristik

Die Richtcharakteristik wurde mit Hilfe eines Brüel & Kjær Type 3921 Drehtellers im Abstand von 15 cm gemessen. Durch die Ansteuerung des Drehtellers über eine Arduino-Karte war es möglich, eine automatisierte, kontinuierliche 360° Messung in azimutaler Richtung durchzuführen. Nach der 80 Sekunden andauernden Messung wurden die Messdaten in MATLAB verarbeitet. Um 360 Messwerte im Polardiagramm darzustellen, wurden die Messdaten für die jeweiligen Frequenzen im Terzband ausgewertet und auf eine Auflösung von 1° in Azimutalerichtung gemittelt.

Zur Darstellung der Richtcharakteristik als 3D-Ballon-Diagramm wurden zusätzlich 19 Abstrahlrichtungen in Elevationsrichtung gemessen, um eine Auflösung von 10° in Elevationsrichtung zu erhalten.

Polardiagramm

Bei der Richtcharakteristik für die horizontale Ebene in Abb. 6 ist ab einer Frequenz von 20 kHz (800 Hz) eine beginnende Abweichung von der omnidirektionalen Abstrahlcharakteristik zu erkennen. Unter 20 kHz (800 Hz) entspricht die Richtcharakteristik der einer Kugel und wurde deshalb nicht abgebildet. Während bei 20 kHz (800 Hz) kaum eine Veränderung der Richtcharakteristik festzustellen ist, lassen sich bei 40 kHz (1.6 kHz) die Bündelungen der einzelnen Schallwandler deutlich erkennen. 40 kHz entspricht einer Wellenlänge von 8 mm und ist damit im Bereich des Durchmesser der Membran von 7 mm, wodurch der auftretende Effekt der Lautsprecherbündelung zu erklären ist. Eine deutliche Abweichung von der omnidirektionalen Richtcharakteristik bei den Frequenzen von 80 kHz (3.4 kHz) sowie 140 kHz (5.6 kHz) ist festzustellen.

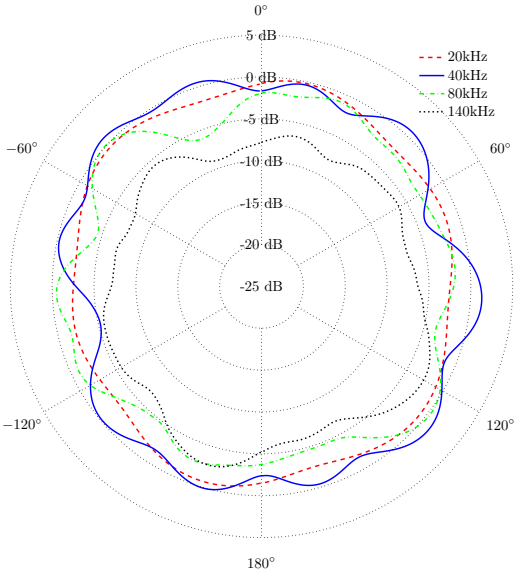

Abbildung 6: Richtcharakteristik für die horizontale Ebene. Unter 20 kHz entspricht die Richtcharakteristik des Dodekaeders der einer Kugel

3D-Ballon-Diagramm

Die vollständige Darstellung des räumlichen Abstrahlverhaltens in dreidimensionaler Form ist in Abb. 7 und Abb. 8 dargestellt. Hierbei wurde die farbliche Skalierung auf den höchsten Wert des gemessenen Schalldruckpegel bei 40 kHz (1.6 kHz) normiert. Aus Darstellungsgründen sind die Radien der einzelnen Diagramme normiert auf die maximale Aussteuerung bei der jeweiligen Frequenz. Die 12 Positionen der Lautsprecher im Dodekaeder sind durch die Zahlen 1-12 dargestellt. Die annähernd kugelförmige Richtcharakteristik bei 20 kHz (800 Hz) ist in Abb. 7 zu erkennen. Die Hauptkeulen sowie eine Überlagerung der Nebenkeulen, die aufgrund von Phasenüberlagerung entstehen, sind bei der Darstellung des Abstrahlverhaltens von 40 kHz zu erkennen und stimmen mit den ungefähren Positionen der Schallwandler überein. Bei 80 kHz (3.4 kHz) und 140 kHz (5.6 kHz) ist ein deutliches Aufbrechen der Richtcharakteristik zu festzustellen.

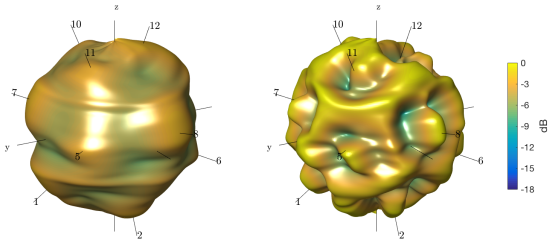

Abbildung 7: Räumliches Abstrahlverhalten des Dodekaeders: links: 20 kHz (800 Hz), rechts: 40 kHz (1.6 kHz)

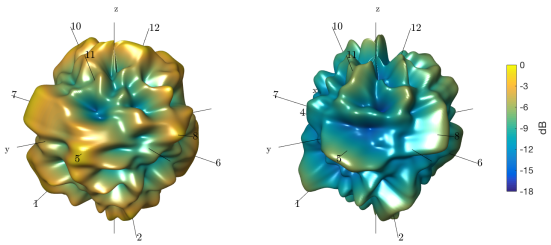

Abbildung 8: Räumliches Abstrahlverhalten des Dodekaeders: links: 80 kHz (3.2 kHz), rechts: 140 kHz (5.6 kHz)

Maximale Abweichung

In Tabelle 1 sind die in der DIN EN ISO 3382-1 angegebenen höchstzulässigen Abweichungen in Dezibel für eine Schallquelle bei der Anregung mit Rosa Rauschen im Freifeld abgebildet. Hierbei wurde eine kontinuierliche 360° Messung mit dem B&K Type 3921 Drehteller bei Rosa Rauschen durchgeführt und die Energie anschließend über gleitende 30°-Bogenbereiche gemittelt und zur Energie einer 360° Mittelung normiert. Der Abstand zwischen Mikrofon und Quelle betrug während der Messung 15 cm, dies entspricht im Originalmaßstab 3.75 m und erfüllt damit den geforderten minimalen Abstand von 1.5 m nach DIN EN ISO 3382-1. In Abb. 9 ist die maximale Abweichung der Richtcharakteristik des Dodekaeders von der einer kugelförmigen Abstrahlung dargestellt. Die Abstrahlcharakteristik des Dodekaeder befindet sich innerhalb der geforderten Grenzen.

Tabelle 1: Höchstzulässige Abweichung einer Schallquelle von der kugelförmiger Abstrahlung in Dezibel nach DIN EN ISO 3382-1 bei einer Anregung mit Oktavbändern des Rosa Rauschens

Original [Hz]	125	25	500	1 k	2 k	4 k
Modell [kHz]	3.1	6.3	12.5	25	50	100
Abweichung [dB]	±1	±1	±1	±3	±5	±6

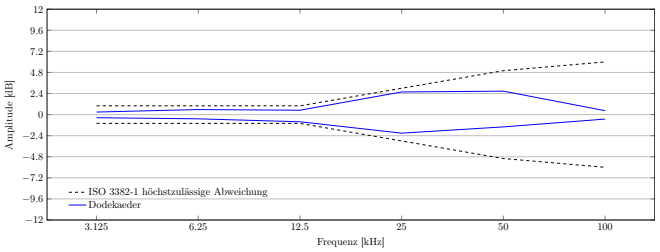

Abbildung 9: Abweichung des Dodekaeders von der kugelförmiger Abstrahlung in Dezibel bei einer Anregung mit Oktavbändern des Rosa Rauschens. Energie gemittelt über 30°-Bogenbereiche

Raumimpulsantworten

Für eine erste Orientierungsmessung im Halbmodell wurde der Dodekaeder nahe der Schnittachse an der Stel-

le der Bühne platziert. Die Position von Mikrofon und Dodekaeder ist in Abb. 10 markiert. Untersucht werden sollten unter anderem die Auswirkung der herausnehmbaren Akustikdecke im Modellraum auf die Raumimpulsantwort. Da es sich um ein Halbmodell handelt, sollte des Weiteren festgestellt werden, inwieweit eine Messung der Raumimpulsantwort im Halbmodellraum des Kuppelsaals möglich ist.

An unterschiedlichen Stellen im Modell (Parkett, 1.Oberrang, 2.Oberrang) wurden Messungen mit dem Referenzmikrofon durchgeführt. Angeregt wurde der Raum mit einem 15 s langen ESS, der Messabstand zwischen Mikrofon und Dodekaeder betrug für den 1.Oberrang 90 cm. Die Schnittkante des Halbmodells wurde während der Messungen nicht abgeschlossen und blieb offen. Auf Grund der Größe des Raumes in dem sich das Modell während der Messung befand, konnte eine Einstreuung in die gemessene Raumimpulsantwort durch Reflexionen an schallharten Wänden außerhalb des Modells ausgeschlossen werden. In Abb. 11 ist die Raumimpulsantwort

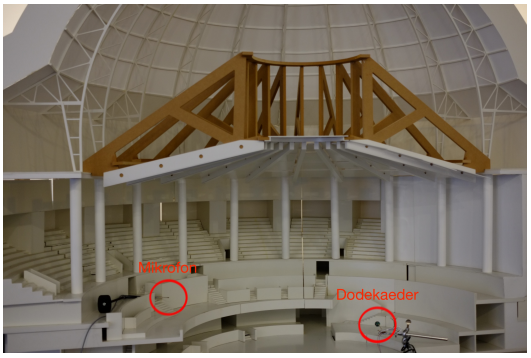

Abbildung 10: Raummodell des Kuppelsaals im Maßstab 1:25 mit eingehängter Akustikdecke. Messposition: 1.Oberrang

einer Messung im 1.Oberrang mit eingehängter Akustikdecke dargestellt. Deutlich ist in der Raumimpulsantwort der eintreffende Direktschall nach 2.6 ms sowie eine starke Reflexion nach 4.9 ms zu erkennen. Die Distanz des zurückgelegten Schalls bei der Reflexion nach 4.9 ms entspricht dem Ausbreitungsweg des Schalls über die Akustikdecke zur Messposition (siehe untere Skalierung Abb. 11). Bei der Messung ohne akustische Decke, dargestellt in Abb. 12, ist im Vergleich zu Abb. 11 festzustellen, dass die Reflexion nach 4.9 ms fehlt. Da es sich um eine erste Orientierungsmessung handelte, wurden noch keine raumakustischen Parameter berechnet. Des Weiteren wurde die Luftschallabsorption noch nicht berücksichtigt.

Zusammenfassung

Ein Miniaturdodekaeder für raumakustische Messungen im Modellmaßstab 1:25 wurde entwickelt und hinsichtlich seiner akustischen Eigenschaften charakterisiert. Eine Übereinstimmung des Dodekaeders mit den Anforderungen an eine Schallquelle nach DIN EN ISO 3382-1 hinsichtlich des Frequenzgangs von 3.1 kHz (125 Hz) bis 100 kHz (4 kHz) und des Schalldruckpegels konnte gezeigt

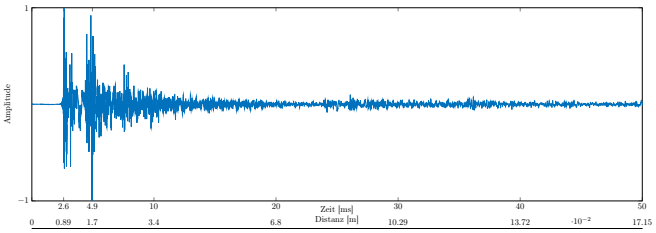

Abbildung 11: Messung der Raumimpulsantwort im 1.Oberrang mit Akustikdecke

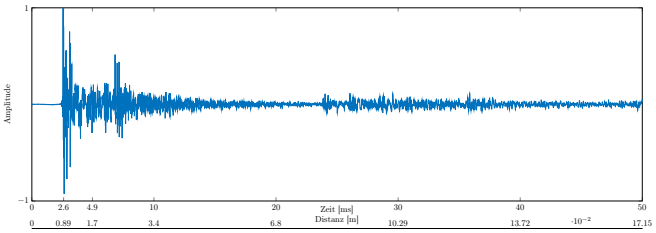

Abbildung 12: Messung der Raumimpulsantwort im 1.Oberrang ohne Akustikdecke

werden. Der Dodekaeder weist eine kugelförmige Richtcharakteristik bis 40 kHz (1.6 kHz) auf, ab 40 kHz tritt eine Bündelung der Wandler ein. Die Abweichung der Richtcharakteristik befindet sich innerhalb der durch die DIN EN ISO 3382-1 geforderten Grenzen.

In einer ersten Orientierungsmessung im Modellraum wurde gezeigt, dass es möglich ist, eine Raumimpulsantwort zur Betrachtung der frühen Reflexionen im Halbmodellraum zu ermitteln. Des Weiteren sind deutliche Unterschiede der Raumimpulsantwort mit eingehängter sowie herausgenommener Akustikdecke festzustellen.

Literatur

[1] DIN EN ISO 3382-1:2009-10 Akustik - Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 1: Aufführungsräume

[2] Culda, T.M., Popa, V.,Stanomir, D., Negrescu, C.: Reducing time in acoustic impulse response measurements using exponential sine sweeps. 2013 International Symposium on Signals, Circuits and Systems

[3] Farina, A.: Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-Sine Technique. Audio Eng. Soc Convention 108, 2000.

[4] Müller, S., Massarani, P.: Transfer-Function Measurement with Sweeps. J. Audio Eng. Soc, 2001

[5] Hidaka, T., Suzuki, K., Yamada, Y.: A New Miniature Loudspeaker For Room Acoustical Scale Model Experiment. Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010.

[6] Hosoe, S., Nishino, T., Itou K., Takeda, K.: Development of Micro-Dodecahedral Loudspeaker for Measuring Head-Related Transfer Functions in The Proximal region. 2006 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2006.