

# Dodekaederlautsprecher mittels 3D-Druck

Sebastian Merchel, Johannes Volkmann, Andreas Nicht, Friedrich Beyer und Ercan Altinsoy

*Technische Universität Dresden, Lehrstuhl für Akustik und Haptik,*

*E-Mail: sebastian.merchel@tu-dresden.de*

## Einleitung

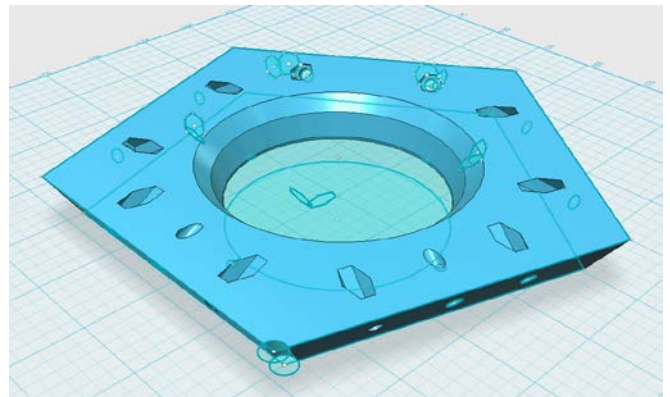
Raumakustische Messungen mit speziellen Messlautsprechern werden zur Bestimmung verschiedener Größen in der Bau- und Raumakustik genutzt. Üblicherweise kommen sogenannte Dodekaederlautsprecher zum Einsatz. Die Schallquelle soll dabei möglichst omnidirektional abstrahlen. Für einen permanenten Aufbau zur Bestimmung des Absorptionsgrades nach DIN EN ISO 354 im Hallraum der TU Dresden wurden etliche solcher Lautsprecher benötigt, welche entworfen und kostengünstig mit Hilfe eines handelsüblichen 3D-Druckers hergestellt wurden.

Dieser Beitrag diskutiert die Auswahl der Treiber und die Auslegung sowie das Design des Gehäuses unter Verwendung einer frei verfügbaren CAD Software. Um den fertig montierten Lautsprecher zu bewerten, wurde die frequenz- und richtungsabhängige Schallabstrahlung des Selbstbaudodekaeders ausgewertet. Mit Hilfe eines Klippel Nahfeldscanners konnte die Richtcharakteristik erfasst und anderen Schallquellen gegenübergestellt werden. Als Referenz kamen Messlautsprecher von Brüel & Kjær, Outline und Norsonic zum Einsatz. Die Berechnung des frequenzabhängigen Direktivitätsindex nach ISO 3382 und ISO 140 erlaubt eine quantitative Bewertung der Omnidirektionalität. Mit Hilfe von Balloon-Plots und Isobarendiagrammen (Contour-Plots) ist ein detaillierterer Vergleich der Richtwirkung möglich. Weiterhin wurde die Frequenzabhängigkeit der abgestrahlten Schallleistung untersucht. Das Ergebnis des Projektes ist ein normgerechter Dodekaederlautsprecher. Die zugrundeliegenden 3D-Modelle werden quelloffen im Internet publiziert, so dass ein einfacher, skalierbarer Nachbau möglich ist.

## Technische Realisierung

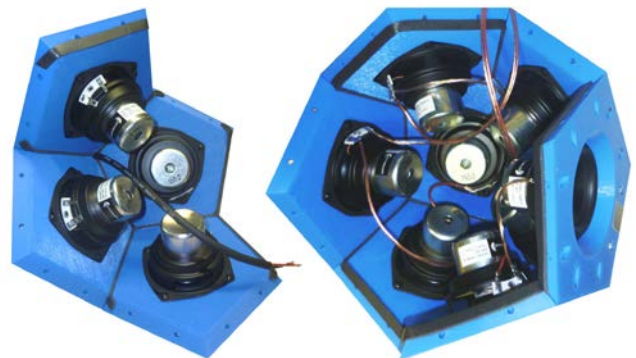
Gegenstand dieser Untersuchung ist der Entwurf und Bau eines allseitig abstrahlenden Messlautsprechers mittels 3D-Druck. Solch omnidirektionale Schallquellen existieren in verschiedenen Varianten [1]. Bei der häufigsten Bauform, dem Dodekaeder-Lautsprecher, ist auf jeder der zwölf Seitenflächen eines regelmäßigen Polyeders ein Lautsprecherchassi montiert. Es spricht einiges dafür einen Dodekaeder-Lautsprecher so klein wie möglich zu gestalten. Zunächst erhält man durch geringere Größe und kleineres Gewicht ein besseres Handling. Außerdem treten Interferenzen aufgrund des geringeren Abstandes zwischen den einzelnen Membranen erst bei höheren Frequenzen auf. Nicht zuletzt spart man bei Nutzung eines 3D-Druckers Material und Zeit ein. Problematisch bei kleinem Innenvolumen ist die schlechte Tieftonwiedergabe, wenig Platz für Treibermagnete und die verminderte Ableitung von Wärme. Es ist also notwendig einen Kompromiss aus kleiner Baugröße und ausreichender Tiefenwiedergabe zu finden. Es

wurden verschiedene Gehäuse- und Treiberkombination simuliert und der 3.50" Treiber Dayton Audio ND91-4 ausgewählt. Das Chassi besitzt einen sehr kleinen und leichten Magneten was für den Einbau im Dodekaeder günstig ist. Es wird ein Innenvolumen von knapp 7 Litern gewählt. Die 12 Seitenflächen des Dodekaeders (Fünfecke mit einer Kantenneigung von  $116,6^\circ$ ) sollen jeweils einzeln gedruckt werden. Sie werden mit der freien Software 123D Design von AUTODESK modelliert (Abbildung 1) und auf der Onlineplattform Thingiverse veröffentlicht [2]. Der Druck erfolgte mit einem Makerbot Z18 (0,2 mm layer height, 2 shells, 10 % diamond infill, 0,8 mm floor and roof thickness). Der Einfluss des verwendeten Druckmaterials (Polylactide, PLA) sowie der Druckeinstellungen ist unbekannt. Eine Analyse der Richtwirkung soll zeigen ob Störschall durch Gehäuseschwingungen abgestrahlt wird.



**Abbildung 1:** Konstruktion eines Moduls des Dodekaeder-Lautsprechers in 123D Design.

Durch die Parallelschaltung von jeweils vier in Serie verbundenen Lautsprecherchassis mit je  $4 \Omega$  ergibt sich eine Gesamtimpedanz von  $5,33 \Omega$ . Bei der Montage (Abbildung 2) ist eine Abdichtung, z.B. mit Schaumstoff, zwischen den Modulen untereinander sowie zum Chassi notwendig.



**Abbildung 2:** Innenansicht des Dodekaeder-Lautsprechers während der Montage.

## Normative Anforderungen

Für die Verwendung als Messlautsprecher in Raum- und Bauakustik werden hinsichtlich omnidirektionaler Schallausbreitung konkrete Anforderungen gestellt. Diese sind für raumakustische Messungen in ISO 3382-1 [3] und für bauakustische Untersuchungen in ISO 16283-1 [4] (ersetzt ISO 140-4) definiert. Dabei werden Toleranzbereiche für die Richtwirkung im Fernfeld festgelegt. Über gleitende 30° Winkelabschnitte erfolgt eine energetische Mittelwertbildung des Schalldrucks. Für deren Abweichung vom 360° Mittelwert sind Toleranzgrenzen je Oktave (ISO 3382-1) bzw. Terz (ISO 16283-1) definiert. Unter 500 Hz liegen diese bei  $\pm 1$  dB bzw.  $\pm 2$  dB und steigen bis 4 kHz bzw. 5 kHz auf  $\pm 6$  dB bzw.  $\pm 8$  dB. Sie sind in Abbildung 6 rot dargestellt.

## Messung der Richtcharakteristika

Um den fertig aufgebauten Lautsprecher akustisch zu bewerten, wird dieser mit einem *Near Field Scanner* der Firma Klippel vermessen (Abbildung 3). Aus einer Vielzahl von Schalldruckmessungen mit hohem SNR im Nahfeld wird dabei das Schallfeld in beliebigen Entfernungen mittels Multipolentwicklung ermittelt. Alle nachfolgenden Daten sind auf einen Abstand von 10 m bezogen.

Die Ergebnisse der Messung können in verschiedenen Grafiken dargestellt werden. Eine sehr intuitive Visualisierung sind die Balloon-Plots. Bei diesen wird das

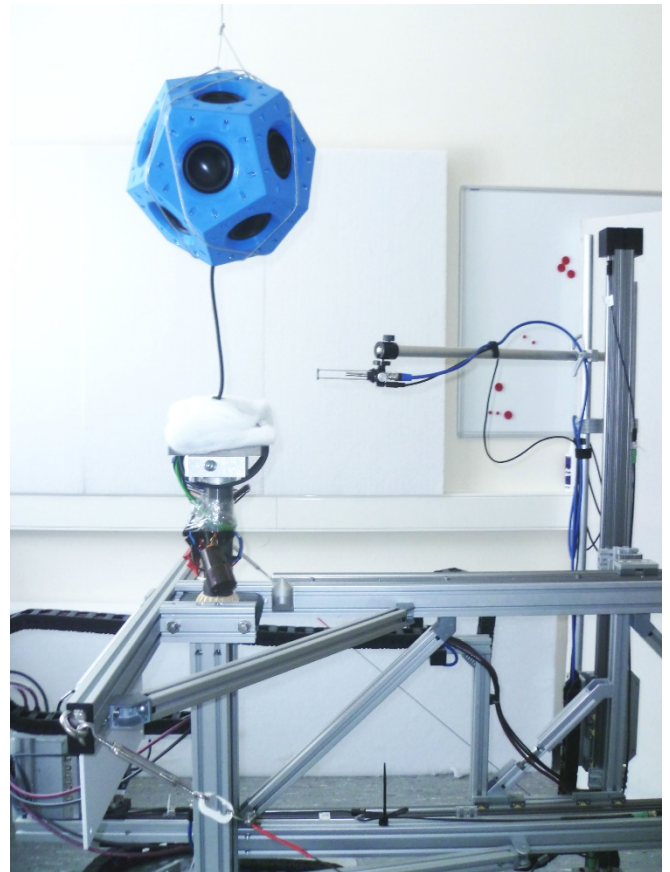


Abbildung 3: Messsetup mit Nahfeldscanner.

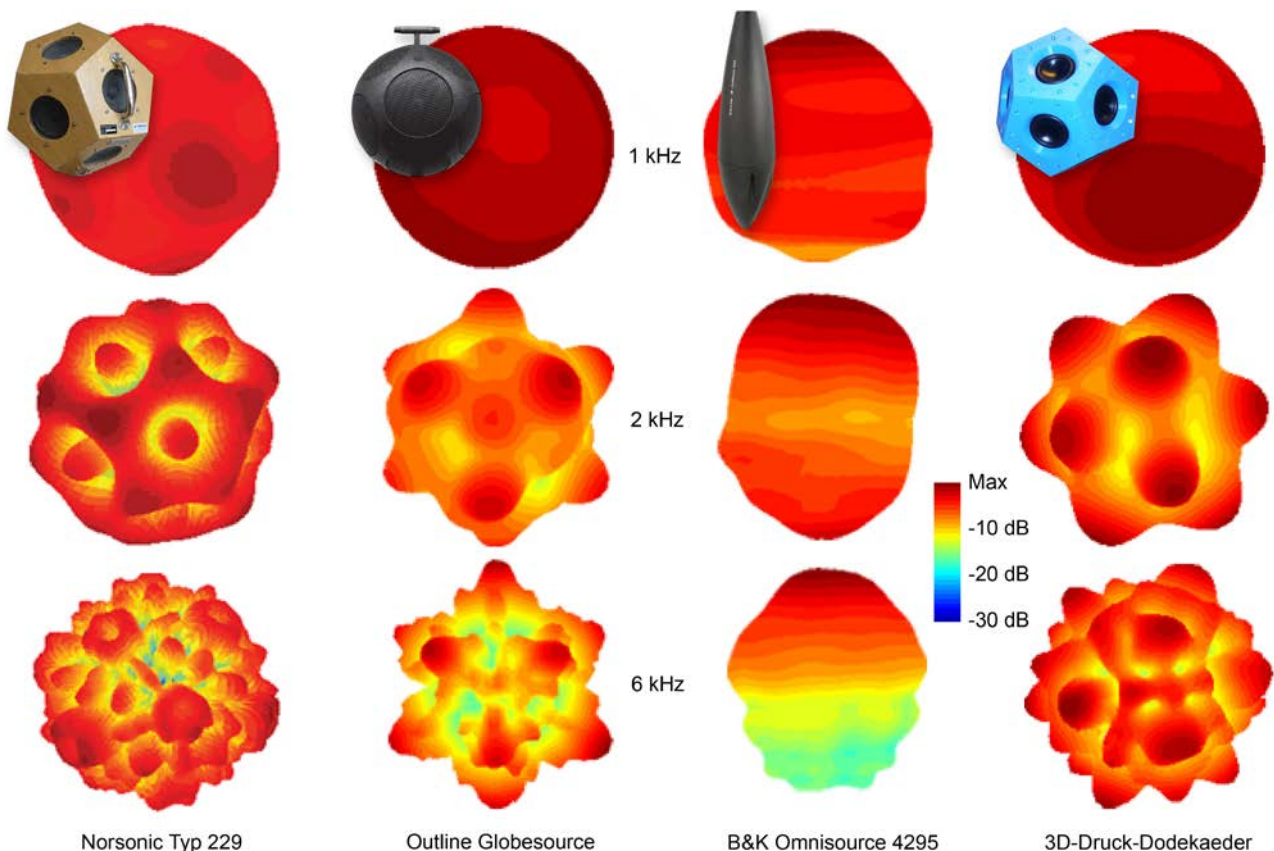


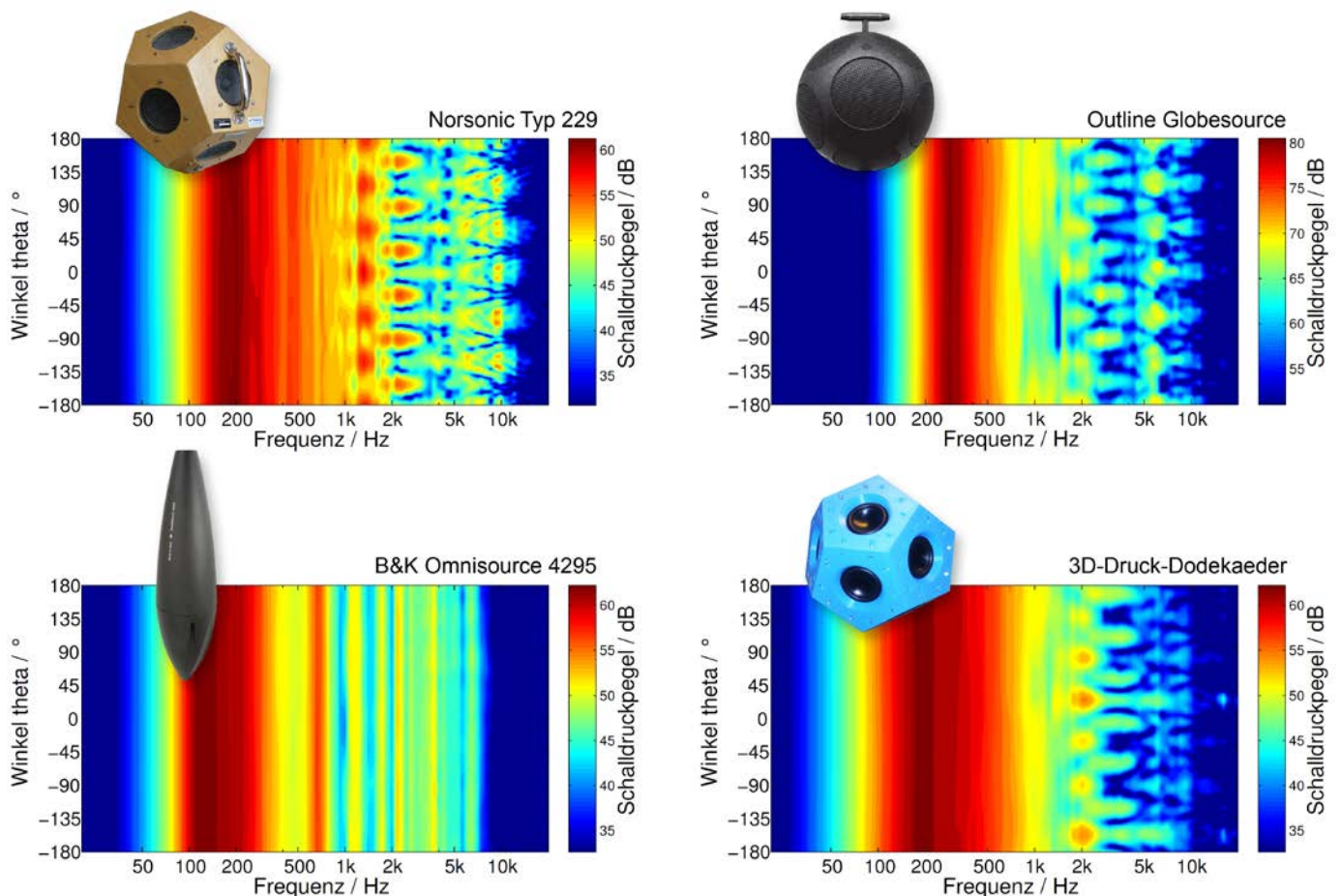
Abbildung 4: Dreidimensionale Richtcharakteristiken für vier Messlautsprecher bei den Frequenzen 1 kHz, 2 kHz und 6 kHz. Jeder Balloon-Plot ist auf sein Maximum normiert.

Abstrahlverhalten des Lautsprechers dreidimensional abgebildet. Die Stärke der Abstrahlung wird dabei sowohl über die räumliche Verzerrung des dargestellten Ballons, als auch über die Farbe der Oberfläche dargestellt. Pro Grafik kann hier aber immer nur ein Abstand und eine Frequenz berücksichtigt werden. Abbildung 4 zeigt Ballon-Plots für den neu konstruierten 3D-Druck-Lautsprecher sowie für drei kommerzielle Schallquellen bei den Frequenzen 1 kHz, 2 kHz und 6 kHz. Wie zu erwarten war ändert sich die Abstrahlung mit der Frequenz. Bei 1 kHz weisen alle Lautsprecher eine nahezu omnidirektionale Richtcharakteristik auf. Bei höheren Frequenzen treten charakteristische Interferenzmuster auf und es kommt zur Ausbildung von verstärkter Abstrahlung in bestimmten Richtungen (Keulen). Für den 3D-Druck-Lautsprecher sowie die Outline Globesource lassen sich gut bei 2 kHz zwölf Hauptkeulen erkennen, die durch die zwölf einzelnen Chassis hervorgerufen werden. Der Lautsprecher von Norsonic zeigt auf Grund des etwas größeren Durchmessers und damit auch einem größeren Lautsprecherabstand bei 2 kHz bereits einige Nebenkeulen die bei den anderen Schallquellen erst für höhere Frequenzen auftreten. Bei 6 kHz ist für alle Dodekaeder ein ausgeprägtes Interferenzmuster sichtbar. Im Gegensatz dazu weist die Omnisource von Brüel & Kjær ein deutlich homogeneres Abstrahlverhalten auf. Allerdings ist hier für mittlere und hohe Frequenzen eine deutliche Bündelung in vertikaler Richtung erkennbar. Dieses Verhalten lässt sich durch die spezielle Bauform des Lautsprechers begründen. Er besitzt im

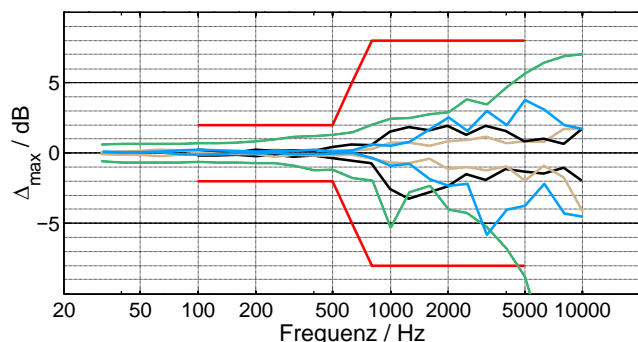
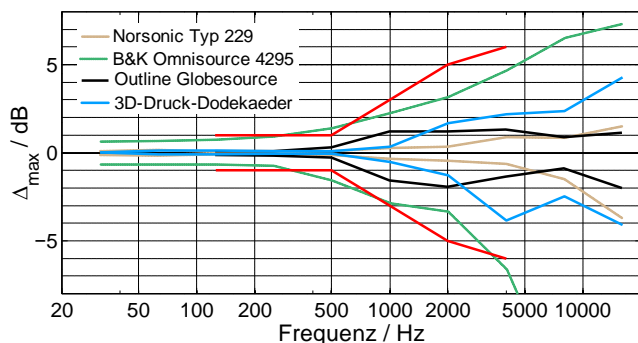
Gegensatz zu den anderen Schallquellen nur einen Treiber der in einem sich nach oben verjüngenden Rohr sitzt. Die Öffnung am Ende des Rohres wurde für die Messungen nach oben gerichtet. Stellt man die Richtcharakteristik als Isobarendiagramm in der Horizontalebene dar (Abbildung 5) so ist die Bündelung nicht mehr sichtbar.

### Vergleich mit ISO-Anforderungen

Aus den Richtcharakteristika lassen sich die in Abbildung 6 dargestellten Direktivitätsindizes nach ISO 3382-1 [3] und ISO 16283-1 [4] ermitteln. Wie bereits in den Isobarendiagrammen ersichtlich, tritt für die gemessenen Dodekaeder erst ab etwa 1 kHz eine Richtwirkung auf. Da die Dichte der Nebenmaxima zu höheren Frequenzen zunimmt, wobei immer eine gleichmäßige Abstrahlung in alle Richtungen gewährleistet ist, bleiben die Direktivitätsindizes über einen weiten Frequenzbereich relativ konstant. Erst bei sehr hohen Frequenzen, wenn die Richtwirkung nicht mehr durch Interferenz zwischen den Chassis, sondern die Richtwirkung der einzelnen Chassis dominiert wird, tritt eine Erhöhung der Direktivitätsindizes auf. Anders verhält es sich prinzipbedingt bei der Brüel & Kjær Omnisource. In Abbildung 6 dargestellt ist die Direktivität für den ungünstigsten Fall – die Vertikalebene. Trotzdem entspricht die Schallquelle im Wesentlichen den normativen Anforderungen. Alle anderen Lautsprecher zeigen Direktivitätsindizes deutlich unterhalb der ISO-Grenzwerte. Die Direktivitätsindizes steigen auch für höhere Frequenzen nicht über  $\pm 4$  dB. Im Vergleich weist der 3D-Druck Lautsprecher etwas größere Direktivitätsindizes auf.



**Abbildung 5:** Isobarendiagrammen (Contour-Plots) für vier Messlautsprecher in der Horizontalebene im Abstand von 10 m ohne Normalisierung auf eine Hauptachse.

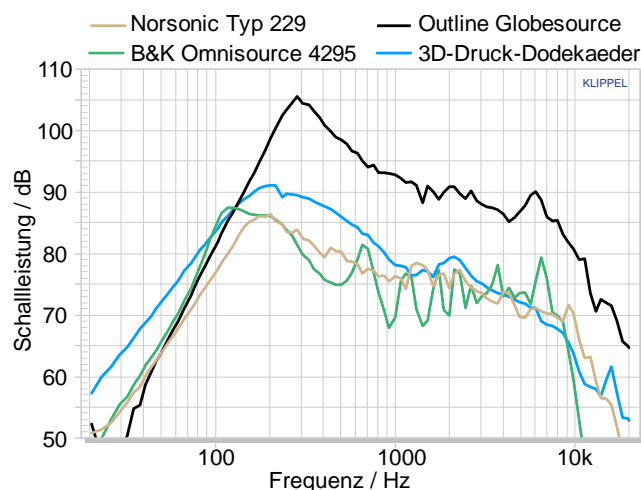


**Abbildung 6:** Frequenzverlauf der Direktivitätsindizes für vier Messlautsprecher im Vergleich mit Toleranzbereichen (rot) nach ISO 3382-1 (oben) und ISO 16283-1 (unten).

## Frequenzgang der Schalleistung

Konventionelle Lautsprecher werden üblicherweise bezüglich ihres Schalldruckfrequenzgangs auf Hauptachse verglichen. Da Dodekaeder-Lautsprecher naturgemäß keine Hauptachse besitzen und bei hohen Frequenzen Interferenzerscheinungen für starke ortsabhängigen Einbrüche sorgen, soll hier stattdessen die durch Integration ermittelte Schalleistung betrachtet werden. Für die vorgesehene Verwendung der 3D-Druck-Lautsprecher im Hallraum spielt die insgesamt abgestrahlte Leistung eine untergeordnete Rolle. Die in Abbildung 7 dargestellte spektrale Verteilung der Schalleistung wurde daher nicht bei maximaler Belastung gemessen und dient dem qualitativen Vergleich der Kurvenverläufe. Für alle Schallquellen ist eine deutliche Resonanz im Tieftonbereich zu erkennen. Bei Norsonic und dem 3D-Druck-Lautsprecher liegt diese bei etwa 200 Hz. Die Outline Globesource zeigt eine höhere Resonanzfrequenz bei 300 Hz und einen steileren Abfall zu tiefen Frequenzen auf Grund der Verwendung von kleinen Bassreflexöffnungen im Gehäuse. Maßgeblich für die Lage der Resonanzfrequenz ist das Innenvolumen des Gehäuses sowie die Chassiparameter. Die Wahl von Gehäusegröße und Treiberabstand stellt immer einen Kompromiss hinsichtlich der Schallabstrahlung bei tiefen Frequenzen und der Richtwirkung bei hohen Frequenzen dar.

Der gemessene Frequenzgang des 3D-Druck-Lautsprechers verläuft vergleichsweise glatt wohingegen die Brüel & Kjær Omnisource deutliche Resonanzen auf Grund des Rohransatzes aufweist.



**Abbildung 7:** Frequenzgang der abgestrahlten Schalleistung der vier Messlautsprecher. Die Schallquellen wurden mit den jeweils zugehörigen Verstärkern und verschiedenen Eingangspegeln betrieben.

## Zusammenfassung

Für den gegebenen Anwendungsfall ist es gelungen einen sehr kostengünstigen Dodekaeder-Lautsprecher herzustellen. Dieser wurde bezüglich seiner Richtcharakteristik untersucht und erfüllt die Anforderungen nach ISO 3382 und ISO 16283.

Die 3D-Druck-Herstellung des Lautsprechergehäuses aus Kunststoff (PLA) im Schmelzschichtungsverfahren (Fused Deposition Modeling, FDM) erzeugt keine kritischen Auswirkungen auf die spektrale Verteilung der abgestrahlten Schalleistung oder die Richtcharakteristik. Dies kann an der verhältnismäßig kleinen Gehäuseoberfläche sowie Versteifung der Teilflächen durch viele Kanten und Montagelöcher liegen. Großflächigere 3D-gedruckte Lautsprechergehäuse in der Lautsprecher AG des Lehrstuhls wurden zur Bedämpfung von Gehäuseschwingungen beispielsweise mit Silikon zwischen zwei Außenwänden gefüllt. Dies ist für den hier vorgestellten Dodekaeder nicht notwendig.

## Danksagung

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

## Literatur

- [1] 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, 2006.
- [2] Quelldateien des 3D-Druck-Lautsprechers, URL: <https://www.thingiverse.com/thing:2816418>
- [3] ISO 3382-1: Akustik – Messung von Parametern der Raumakustik, Teil 1: Aufführungsräume, 2009.
- [4] ISO 16283-1: Akustik – Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau, Teil 1: Luftschalldämmung, 2014.